

А. В. ТРАМБИЦКИЙ

Расчет трансформаторов

ГОУТИ • НКТП • СССР

А. В. Трамбицкий — РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть	По вине
88	1 сверху	$\overline{k_{я}^3}$	$k_{я}^{\frac{1}{3}}$	Типографии
190	16 сверху (во втором и третьем столбцах таблички)	$P_{\mathfrak{z}}$	P_{Σ}	»
268	9 сверху	mm- ...cm	mm = ...cm	»
316	8 снизу	w_2	l_{w_2}	»
318	3 сверху	= 102, W	= 10,2 W	»

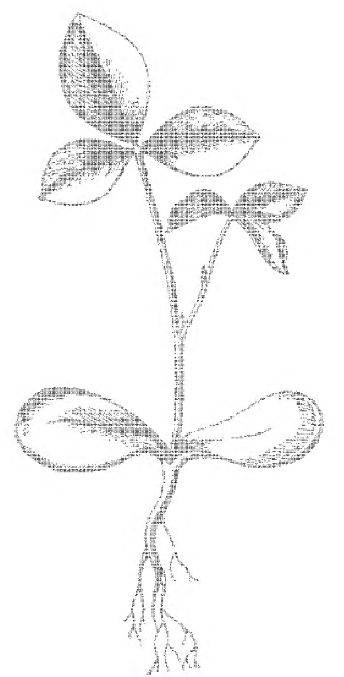
Зак. 576. Трамбицкий.

А. В. ТРАМБИЦКИЙ

РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

*Утверждено ГУУЗ НКТП в качестве
учебного пособия
для энергетических вузов*

Цена 5 р. 75 к., перепл. 1 р. 50 к.



Scan AAW

ГОНТИ НКТП СССР
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
ЛЕНИНГРАД 1938 МОСКВА

В книге излагается систематический метод расчета трансформаторов разных типов.

Основное назначение книги -- служить учебным пособием для энергетических вузов; поэтому в книге даются не только методы расчета, но приводятся примеры комбинирования и расположения всех расчетов. Одновременно книга является справочным пособием по расчету трансформаторов для начинающих расчетчиков и всех электриков, которым приходится иметь дело с ремонтом и переделкой трансформаторов. Пользуясь прилагаемым формуляром и примерами, читающий изучает отдельные места книги по мере продвижения расчета. К книге приложены относящиеся к примерам чертежи и справочные таблицы.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.
7

Предисловие

Часть первая

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА

Глава I. Общие указания и терминология

§ 1. Указания начинающим 9
§ 2. Основная терминология для трансформаторов и их деталей; типы трансформаторов 10

Глава II. Краткий обзор конструкций и производства трансформаторов

§ 3. Примеры конструкций трансформаторов 18
§ 4. Краткие сведения о производстве трансформаторов 21

Глава III. Основные принципы расчета трансформаторов

§ 5. Основное задание 24
§ 6. Основные этапы развития методов расчета трансформаторов . . . 26
§ 7. Расчет трансформаторов по Арнольду 27
§ 8. Некоторые частные случаи классических расчетов 29
§ 9. Основные законы „геометрии“ трансформаторов 32
§ 10. Вопросы экономики при проектировании трансформаторов 36
§ 11. Общие технические требования, предъявляемые к трансформаторам 40
§ 12. Практические расчеты; метод расчета автора 41

Глава IV. Общий ход расчета и предварительная стадия расчета

§ 13. Общий ход расчета 43
§ 14. Практическое задание 44
§ 15. Расчет основных электрических величин 46
§ 16. Разбор и оценка задания; выбор типа конструкции 46

Глава V. Расчет трансформаторов разных типов

§ 17. Расчет стержневого трансформатора 58
§ 18. Расчет броневых трансформаторов 59
§ 19. Расчет серий трансформаторов 60
§ 20. Особенности расчета автотрансформаторов 61
§ 21. Особенности расчета трехобмоточных трансформаторов 65
§ 22. Особенности расчета некоторых специальных трансформаторов . . 67
§ 23. Перерасчет готовых трансформаторов на другие данные 72

Часть вторая

ЭЛЕМЕНТЫ ДЕТАЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Глава VI. Расчет и конструкция сердечников

§ 24. Основные требования, которым должен удовлетворять сердечник . . 74
§ 25. Материал сердечника 74
§ 26. Выбор сорта стали и величины магнитной индукции 76

	Стр.
§ 27. Изоляция сердечника	79
§ 28. Способы сборки сердечников	80
§ 29. Расчет сердечников стержневых трансформаторов	82
§ 30. Величина и форма сечения яра стержневых трансформаторов	87
§ 31. Расчет сердечников броневых трансформаторов	90
§ 32. Главный магнитный поток	92
§ 33. Раскрой листов; определение числа листов для сердечника	92
§ 34. Вес сердечника	93

Глава VII. Расчет и конструкция обмоток

А. Основные указания

§ 35. Основные требования, предъявляемые к обмоткам; задача расчета обмоток	95
§ 36. Составление схемы соединения обмоток; обозначение начал и концов обмоток	96
§ 37. Э. д. с., индуктируемая в обмотке; напряжение витка	97
§ 38. Определение числа витков	98
§ 39. Выбор типа обмотки	99
§ 40. Материал обмоток	100
§ 41. Выбор плотности тока	104
§ 42. Определение сечения провода	106
§ 43. Способы регулирования напряжения и устройство ответвлений	107
§ 44. Выполнение ответвлений и отводов; вывод нулевой точки	110

В. Проектирование обмоток разных типов

§ 45. Обмотки из цилиндрических катушек	111
§ 46. Обмотки из простых дисковых катушек	113
§ 47. Обмотки из многорядных дисковых катушек	116
§ 48. Непрерывные обмотки	119
§ 49. Винтовые обмотки	120
§ 50. Специальные обмотки для очень больших токов	122
§ 51. Специальные обмотки для весьма высоких напряжений	123

С. Различные расчеты, касающиеся обмоток

§ 52. Подсчет веса обмоток	125
§ 53. Подсчет индуктивности симметричных и несимметричных обмоток	126
§ 54. Индуктивность шин	135

Глава VIII. Расчет и конструкция изоляции

§ 55. Воздействия, которым подвергается изоляция трансформаторов	137
§ 56. Испытательные напряжения трансформаторов	141
§ 57. Изоляционные материалы, применяемые для трансформаторов	142
§ 58. Трансформаторное масло	146
§ 59. Диэлектрики в электрическом поле трансформатора	148
§ 60. Выбор изоляции проводов	154
§ 61. Важнейшие изоляционные детали	154
§ 62. Конструкции обмотки и изоляции, предусматривающие борьбу с перенапряжениями	157
§ 63. Расчет и выбор важнейших изоляционных промежутков	161
§ 64. Проходные изоляторы	170

Глава IX. Общие электрические расчеты трансформатора

А. Ток холостого хода

§ 65. Ток холостого хода однофазного трансформатора	173
§ 66. Ток холостого хода трехфазного трансформатора	175
§ 67. Определение намагничивающих киловольт-ампер	176

В. Потери и к. п. д. трансформатора

§ 68. Основные потери в сердечнике	177
§ 69. Добавочные потери при холостом ходе	182

	Стр.
§ 70. Кривые холостого хода	183
§ 71. Джоулевы потери в обмотках	184
§ 72. Добавочные потери в обмотках при нагрузке	185
§ 73. Прочие добавочные потери при нагрузке	188
§ 74. Общие потери и их зависимость от нагрузки	189
§ 75. К. п. д. трансформатора	189
<i>С. Напряжение короткого замыкания и изменение напряжения</i>	
§ 76. Активные сопротивления обмоток	190
§ 77. Напряжение короткого замыкания и треугольник короткого замыкания	191
§ 78. Процентное изменение напряжения	192
Глава X. Тепловые расчеты трансформаторов	
§ 79. Источники тепла в трансформаторах; охлаждающая среда	193
§ 80. Путь теплового потока; общая картина распределения перепадов температур в трансформаторах	193
§ 81. Допустимые по нормам температуры и превышения температуры	196
§ 82. Процессы передачи тепла в трансформаторах	197
§ 83. Естественная и принудительная циркуляции охлаждающей среды	205
§ 84. Удельная тепловая нагрузка поверхности охлаждения	205
§ 85. Охладительные каналы и охлаждающие листы	208
§ 86. Распространение тепла в сердечнике и перепад температуры на его поверхности	210
§ 87. Перепад температуры на поверхности обмоток	215
§ 88. Внутренний перепад температуры в сердечнике	217
§ 89. Внутренний перепад температуры в обмотках	219
§ 90. Перепад температуры от масла к стенке охладителя	223
§ 91. Перепад температуры от стенки охладителя к окружающему воздуху	223
§ 92. Кривые нагревания и охлаждения	224
§ 93. Постоянные нагревания трансформатора	226
§ 94. Основные следствия уравнения нагревания трансформатора	227
§ 95. Зависимость превышения температуры трансформатора от его нагрузки	230
§ 96. Повышение температуры обмоток при коротких замыканиях	231
Глава XI. Тепловые расчеты баков и охлаждающих систем	
§ 97. Определение размеров баков и кожухов	233
§ 98. Баки гладкие	235
§ 99. Баки волнистые	236
§ 100. Баки трубчатые	239
§ 101. Баки радиаторные и отдельно стоящие радиаторные охладители	241
§ 102. Действие добавочного обдувания	242
§ 103. Расчет внутреннего водяного охлаждения	245
§ 104. Расчет охладителей с принудительной циркуляцией масла	247
Глава XII. Механические расчеты деталей трансформаторов	
§ 105. Механические силы, действующие при коротких замыканиях	250
§ 106. Действие механических сил на обмотки трансформаторов	253
§ 107. Механические расчеты других деталей трансформаторов; детали баков	259
§ 108. Подсчет веса трансформатора, его частей и масла	261
Часть третья	
ФОРМУЛЯР И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ	
§ 109. Формуляр по расчету стержневого трансформатора с круглыми concentрическими обмотками	263
§ 110. Пример 1. Расчет трехфазного трансформатора 50 kVA, 10 000/400 V, 50 Hz с естественным масляным охлаждением	274

	Стр.
§ 111. Пример 2. Расчет трехфазного трансформатора 50 kVA, 500/230 V 50 Hz с естественным воздушным охлаждением	293
§ 112. Пример 3. Расчет однофазного трехобмоточного трансформатора 5000/3000/3000 kVA, $\frac{110}{\sqrt{3}} / \frac{33}{\sqrt{3}} / 6,6$ kV, 50 Hz с естественным масляным охлаждением	
§ 113. Пример 4. Расчет однофазного трансформатора 0,5 kVA, 500/230 V, 50 Hz с естественным воздушным охлаждением	314
Указатель литературы	329

Приложения

- Таблица I.* Основные данные силовых трехфазных трансформаторов с естественным масляным охлаждением для частоты 50 Hz в исполнении МТЗ.
- Таблица II.* Основные данные мощных трансформаторов для частоты 50 Hz в исполнении МТЗ.
- Таблица III.* Физические постоянные некоторых материалов (проводники).
- Таблица IV.* Физические постоянные некоторых материалов (изоляторы).
- Таблица V.* ОСТы электротехнические и некоторые другие, относящиеся к трансформаторам.
- Чертеж I.* Общий вид трехфазного трансформатора 50 kVA, 10 000/400 V, 50 Hz с естественным масляным охлаждением.
- Чертеж II.* Общий вид трехфазного трансформатора 50 kVA, 500/230 V, 50 Hz с естественным воздушным охлаждением.
- Чертеж III.* Общий вид однофазного трехобмоточного трансформатора 5000/3000/3000 kVA, $\frac{110}{\sqrt{3}} / \frac{33}{\sqrt{3}} / 6,6$ kV, 50 Hz с естественным масляным охлаждением.
- Чертеж IV.* Детали к чертежу III.
- ОСТ 2524. Трансформаторы силовые масляные.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Среди существующей технической литературы, как русской, так и иностранной, до сих пор не было учебного пособия, посвященного специально расчету трансформаторов. В большинстве как классических, так и новых книг эта тема затрагивается или в конце изложения теории трансформаторов [Л. 2, 11, 11a], или даже вкрапливается среди общего материала, охватывающего как машины, так и трансформаторы [Л. 21].

Учащиеся, впервые приступающие к расчету, имея даже достаточное количество сведений, но не обладая опытом по расчету, не умеют пользоваться этими сведениями, так как не знают, с чего начать и как расположить расчеты, чтобы избежать чрезмерного количества изменений и переделок. В проходимых же теоретических дисциплинах подобные указания не даются, да и не могут даваться.

Для некоторой ориентировки учащихся автором, руководящим в течение ряда лет проектированием трансформаторов в Электротехническом институте им. В. И. Ленина и в Индустриальном институте им. М. И. Калинина, еще в 1931 г. была выпущена брошюра „Расчет трансформаторов стержневого типа“, принесящая свою долю пользы.

Брошюра, как и данная книга, основывается на методе расчета трансформаторов, впервые предложенном автором еще в 1926 г. [Л. 33]. Основная его мысль очень проста. Поскольку индуктивность e_s трансформатора является заданной прямо или косвенно (требование параллельной работы), эта величина должна быть положена в основу расчетов, так как она находится в тесной связи с рядом других величин, определяющих весь трансформатор. Этим методом автор пользуется сам, работая в области трансформаторостроения 15 лет; этот же метод принят с тех пор и в ряде других руководств [Л. 10, 12, 17]. Второй основой для расчетов является обеспечение для обмоток достаточной поверхности охлаждения.

Книга состоит из трех совершенно различных частей. Часть первая изложена систематически и предназначена для ознакомления с терминологией, с конструкциями и методами расчета. Вторая часть имеет справочный характер; каждая из глав трактует об одном из основных вопросов детального расчета. Эта часть полна ссылок на разные места книги и на литературу.

Ссылки, правда, затрудняют чтение, но неизбежны для взаимной связи глав и параграфов. Третья часть содержит формуляр для расчета, примеры и приложения.

Для начинающих автор рекомендует концентрический охват расчета в три стадии: разбор задания, предварительный расчет и детальный расчет. Это может показаться чрезмерно громоздким, однако ничего нового в этом нет. Совершенно так же поступает всякий, даже опытный проектировщик при расчете новой конструкции; но он проводит начальные стадии расчета иногда прямо в уме, без всякой видимой системы комбинируя и увязывая многие факторы сразу. Ничего подобного не может делать тот, кто приступает к расчетам впервые; о подобном подходе к расчету он даже не подозревает, тем более, что всякая конструкция для него является новой. Параграф 16 книги, посвященный разбору и оценке задания, помогает разобраться в задании и подумать над ним прежде, чем приступать к расчету. Далее, при предварительном расчете начинающий еще нуждается в направляющих указаниях, даваемых при каждом пункте формуляра, но уже получает понятие (§ 17) о гибкости и варьировании расчетов. При детальном расчете после некоторого ознакомления с методами расчета и с самой книгой читатель уже вовсе освобождается от „опеки“; против соответствующих пунктов формул даются лишь ссылки на параграфы, трактующие о данном расчете.

Автор придерживается того взгляда, что расчет почти неотделим от конструирования, и рекомендует параллельно с расчетом составление эскизов рассчитываемой конструкции. Поэтому в книгу пришлось включить и некоторые элементы конструирования, несмотря на наличие специальных пособий по этому вопросу [Л. 28].¹

Небольшой объем книги и отсутствие подобных руководств затрудняли автора в подборе материала. Большая часть формул приведена без выводов, относящихся к общей теории трансформаторов; несколько подробнее затронуты вопросы нагревания и охлаждения, которым часто уделяется недостаточно внимания. Расчет нагревания сердечника (§ 86) приведен для указания метода подобных расчетов. Расчет большого трехобмоточного трансформатора (пример 3) из-за недостатка места не мог быть приведен полностью.

Автор приносит также глубокую благодарность проф. Г. Н. Петрову и инж. М. А. Асташеву, прочитавшим рукопись и сделавшим ряд ценных указаний, и Т. А. Трамбицкой, разделившей труд автора в отношении изготовления рисунков и оформления рукописи.

А. Трамбицкий

¹ См. также [Л. 24].

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА

ГЛАВА I

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ

§ 1. Указания начинающим

1. Нельзя приступать к проектированию, не только детальному, но и предварительному, не выяснив раньше основных черт проектируемого трансформатора, т. е. не представив себе, как могут выглядеть его сердечник, обмотки и т. д. Например, обмотки на 10, 500 или 10000 А будут иметь совсем различный вид. За отсутствием опыта начинающий должен стараться познакомиться с конструкциями трансформаторов хотя бы по описаниям настоящей книги (§ 3—4), или по атласу [Л. 24], или по иным описаниям [Л. 25—32]. Более опытному глазу много говорит иногда даже фотография активной части трансформатора (примерный масштаб фотографии иногда можно бывает определить). Так поступает даже опытный проектировщик при расчете совсем новой конструкции, не говоря о том, что он старается не упустить случая посмотреть в натуре конструкции разных заводов и фирм, в особенности конструкции, потерпевшие аварию. Ибо всякая авария является результатом чего-то непредвиденного, какой-то ошибки, а на ошибках мы учимся.

Предварительное выяснение основных черт проектируемого трансформатора производится по указаниям § 16.

2. Чем меньше опыта у рассчитывающего, тем больше следует соблюдать систематичность во всех расчетах. До тех пор, пока окончательно не выяснены основные размеры и величины, не следует увлекаться возможностью подсчета разных второстепенных величин и деталей, хотя бы и казалось, что уже имеются все данные для таких расчетов. Почти наверное потраченный труд будет напрасным; в конечном счете все расчеты придется переделывать. Порядок расчета, рекомендуемый для начинающих, указан в § 13.

3. Следует иметь в виду, что путем одного расчета, даже по самым наилучшим и вернейшим формулам и таблицам, нельзя спроектировать вполне пригодный и выполнимый трансформатор; на первых же стадиях проектирования необходимо делать эскизы. Имея в виду сказанное в п. 2, следует начинать с важнейших деталей трансформатора: обмотки, ее изоляции, сердечника и т. д., переходя затем к баку и другим механическим

частям. Составление эскизов помогает во время заметить необходимость изменения некоторых размеров трансформатора, иногда даже основных; путем тех же эскизов может быть обнаружена крупная ошибка в расчетах или допущениях, которая иначе могла бы остаться незамеченной до самого конца расчета.

Таким именно образом, комбинируя расчет и конструирование и применяя метод последовательных приближений, и рекомендуется начинающему вести расчет.

4. Приложенным к книге формуляром (§ 109) следует пользоваться обдуманно, а не механически, и все время вести сравнение получаемых величин с данными выполненными трансформаторов (табл. I и II в приложении). Разумеется, никакого „закона“ данный формуляр отнюдь не представляет; расчеты можно вести и в ином порядке.

§ 2. Основная терминология для трансформаторов и их деталей; типы трансформаторов

1. По числу фаз следует различать трансформаторы *однофазные* и *многофазные* (чаще трехфазные).

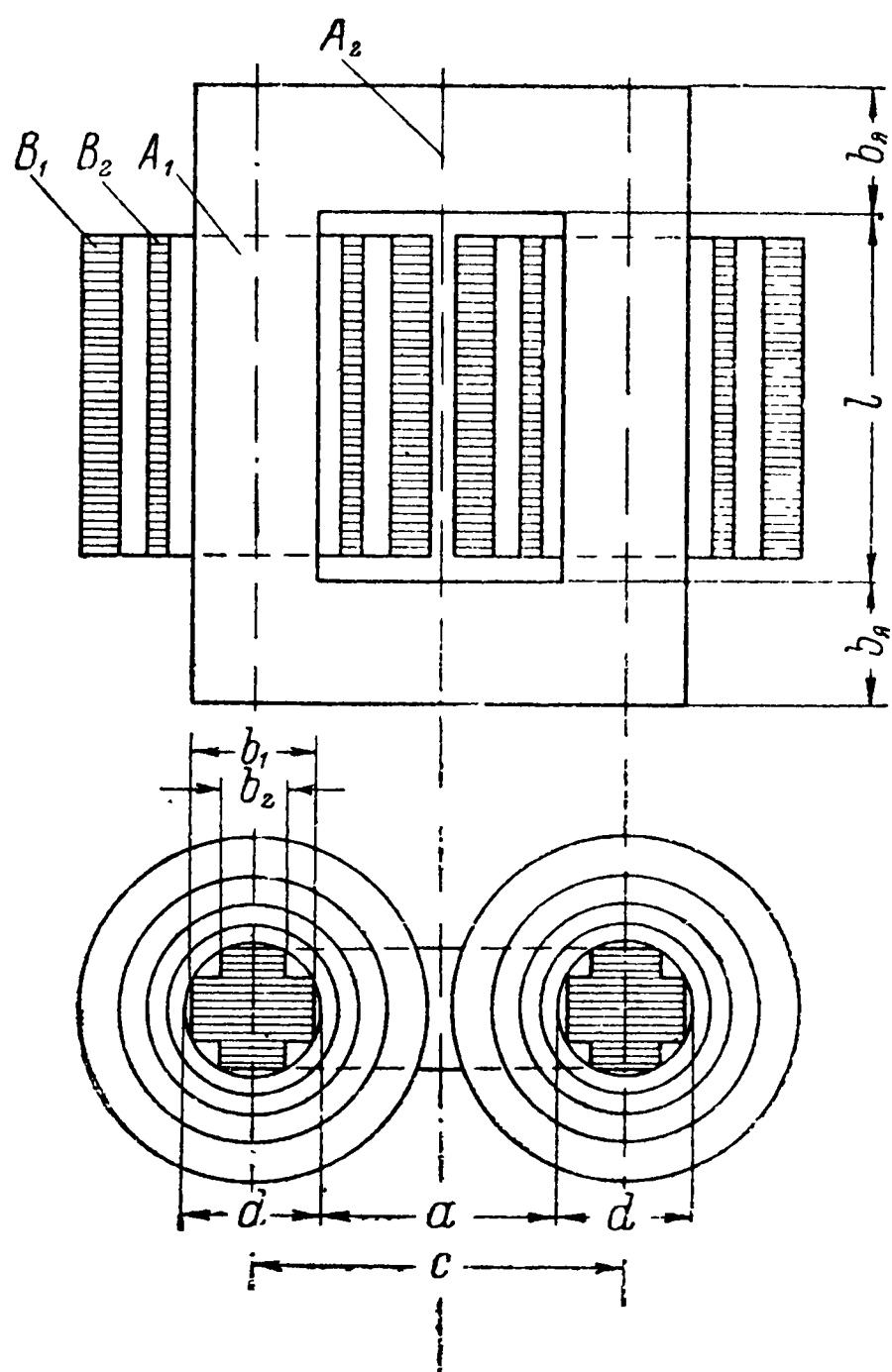


Рис. 1. Однофазный стержневой трансформатор с концентрическими обмотками.

2. Если трансформация трехфазного тока совершается при помощи трех однофазных трансформаторов, то такое устройство называется *трехфазной группой*.

3. Под *напряжением трансформатора* иногда для краткости подразумевают наибольшее из напряжений его обмоток. *Коэффициентом трансформации* будем называть отношение фазных напряжений:

$$k_{12} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}, \quad k_{21} = \frac{U_{2\phi}}{U_{1\phi}}.$$

4. Важнейшими частями трансформатора являются: *A* — сердечник, *B* — обмотки, *C* — изоляция, *D* — станина, *E* — бак или кожух (понятия различные), *F* — отводы, *G* — изоляторы, *H* — охлаждающая система (в некоторых случаях) и *I* — прочие (вспомогательные) детали.

Определение этих частей см. ниже — п. 7—39.

5. Рабочая часть трансформатора, состоящая, как правило, из частей *A, B, C, D* и *F* (см. предыдущий пункт), будет именоваться

иногда для краткости *выемной частью*, поскольку она может быть вынута как одно целое из бака или кожуха.

6. В зависимости от взаимного расположения сердечника и обмоток различают трансформаторы стержневого и броневые типа или, для краткости, *стержневые* и *броневые трансформаторы*. У стержневых трансформаторов (рис. 1 — однофазный, рис. 2 — трехфазный) обмотки B_1 и B_2 охватывают стержни A_1 сердечника, у броневых однофазных (рис. 3) и трехфазных

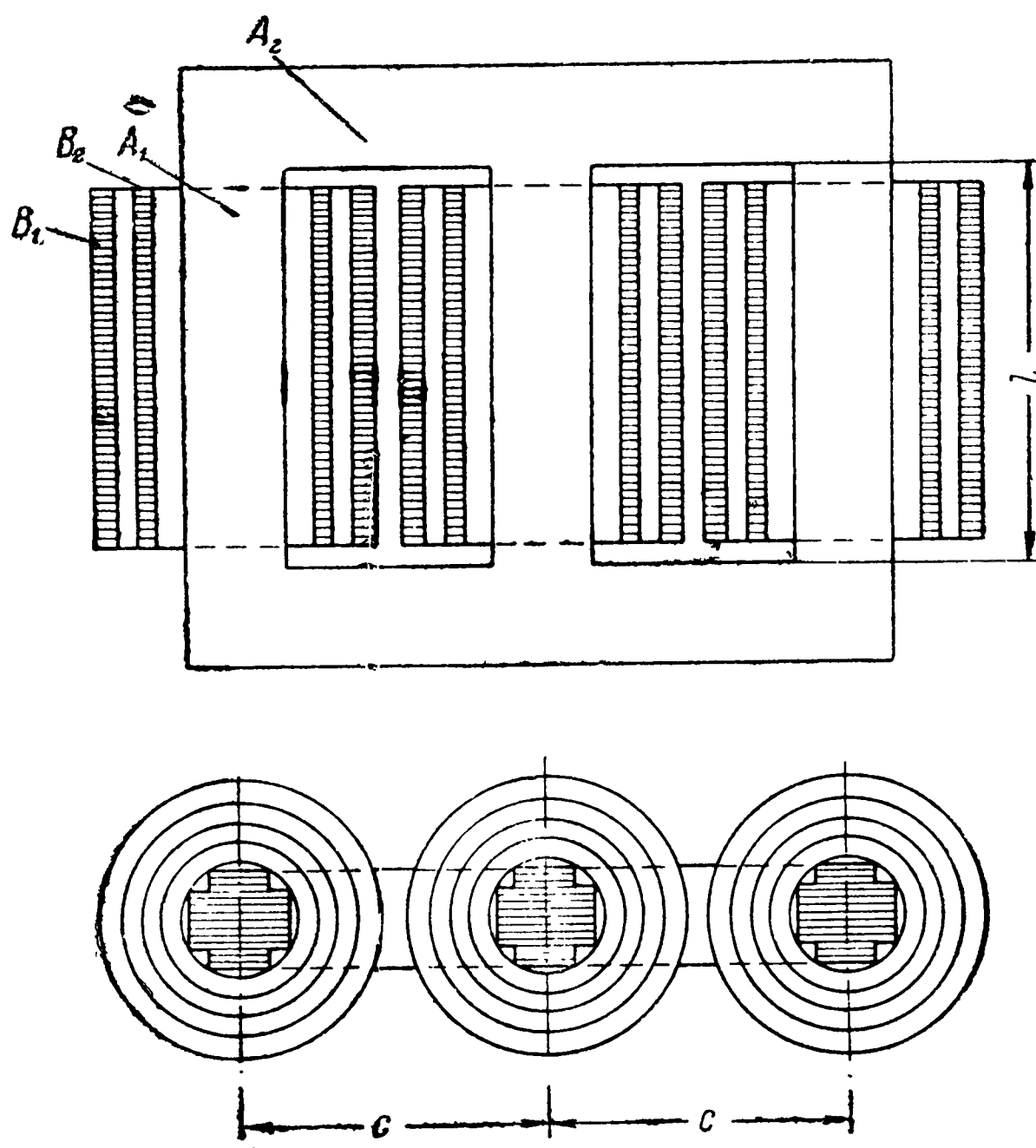


Рис. 2. Трехфазный стержневой трансформатор с концентрическими обмотками.

(рис. 4) — сердечник A охватывает обмотки B_1 и B_2 . Поэтому, например, трансформатор по рис. 5 является броневым, хотя его обмотки по конструкции вполне подобны обмоткам стержневого трансформатора.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ К ПУНКТУ 4

Сердечники

7. *Сердечником* называется магнитная цепь трансформатора со всеми деталями, относящимися к ее конструкции (кроме станины или рамы — см. деталь D).

8. Материал сердечника именуют *сталью*, понимая под этим специальную листовую электротехническую сталь (ОСТ 6391).

9. У стержневых сердечников различают *стержни* A_1 (рис. 1 и 2) — части сердечника, на которых размещены обмотки, и *ярма*

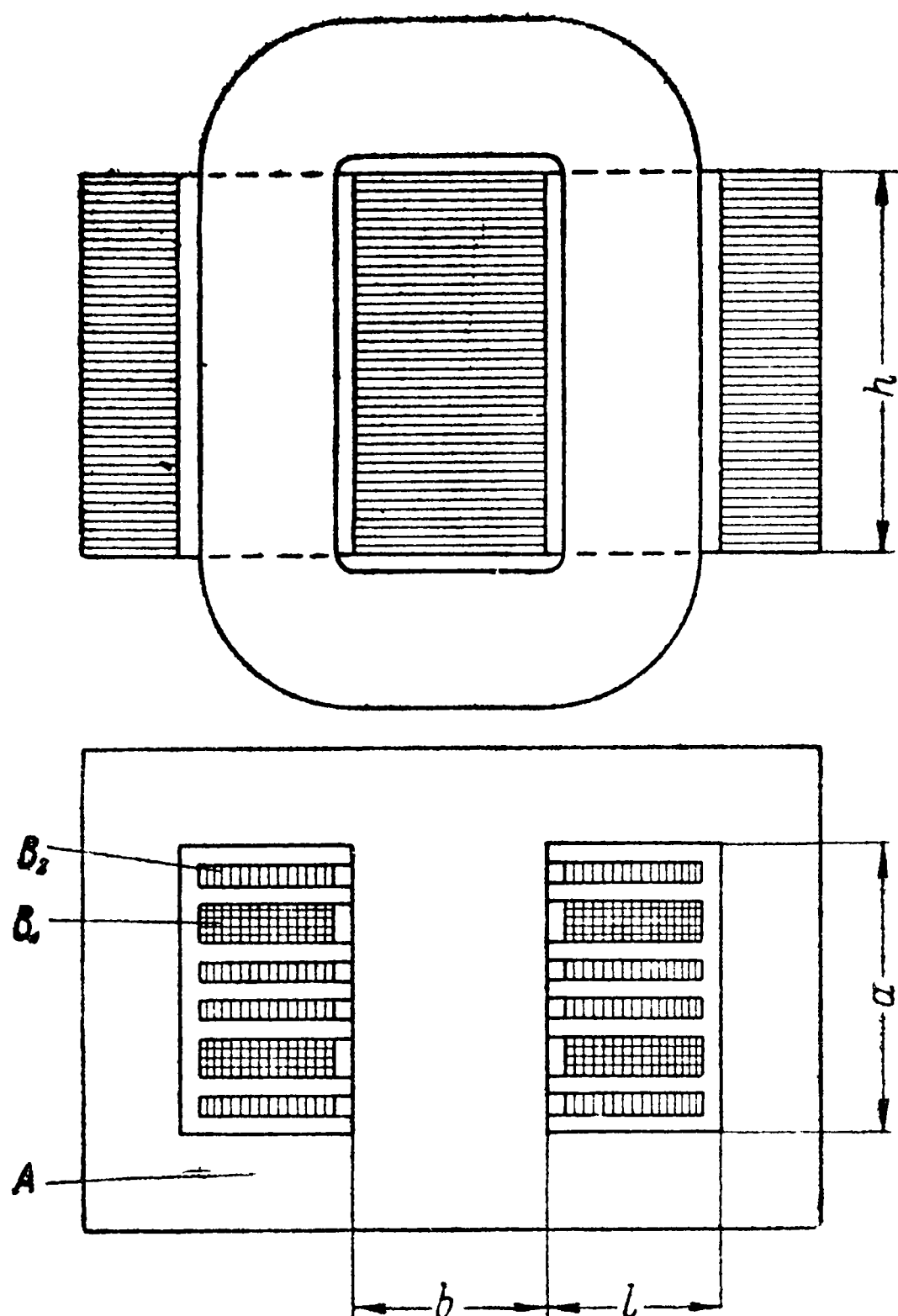


Рис. 3. Однофазный броневой трансформатор с чередующимися обмотками.

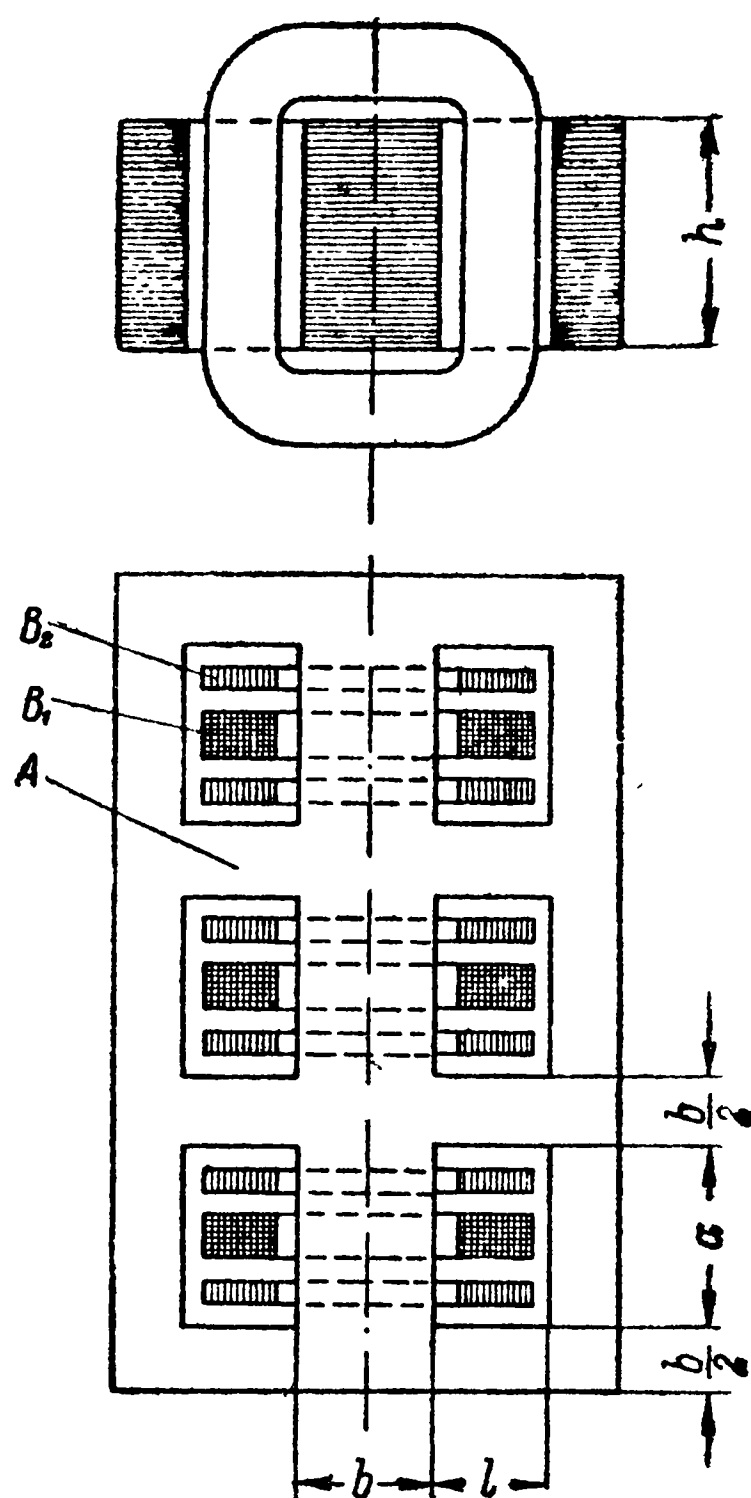


Рис. 4. Трехфазный броневой трансформатор с чередующимися обмотками.

A_2 — части сердечника, служащие для замыкания магнитной цепи через стержни.

10. Пространство, охватываемое магнитной цепью и заполняемое обмотками, изоляцией и каналами, называют *окном* трансформатора; размеры окна обозначены ниже через a и l (рис. 1, 2, 3 и 4), причем при прямоугольной форме сечения сердечника размер a считается от пакета стали (рис. 6), при круглой же — между концами диаметров окружностей, описанных около двух соседних стержней (рис. 1).

11. Стержневые сердечники разделяются по числу стержней на *двух-, трех-, четырех- и пятистержневые*; последние два типа, принадлежащие к категории сложных магнитных систем с принудительным распределением магнитного потока, здесь не рассматриваются (см., например, Л. 25, стр. 436, а также § 32).

12. По расположению стержней сердечники разделяются на *симметричные и несимметричные*. Несимметричным является сердечник обыкновенного трехфазного стержневого трансформатора (рис. 2) в том смысле, что стержни средний и крайний

расположены неодинаково относительно другого крайнего стержня. Несимметричен и трехфазный броневой сердечник (рис. 4), поскольку среднее и крайнее окна расположены неодинаково относительно другого крайнего окна.

13. По способу сборки листов стали различают сердечники со *сборкой впритык и внахлестку* (§ 23).

14. Воздушный (или масляный) промежуток, которым прерывается магнитная цепь, именуется *зазором*; для циркуляции охлаждающего воздуха или масла делаются иногда в сердечнике и в обмотках *каналы*.

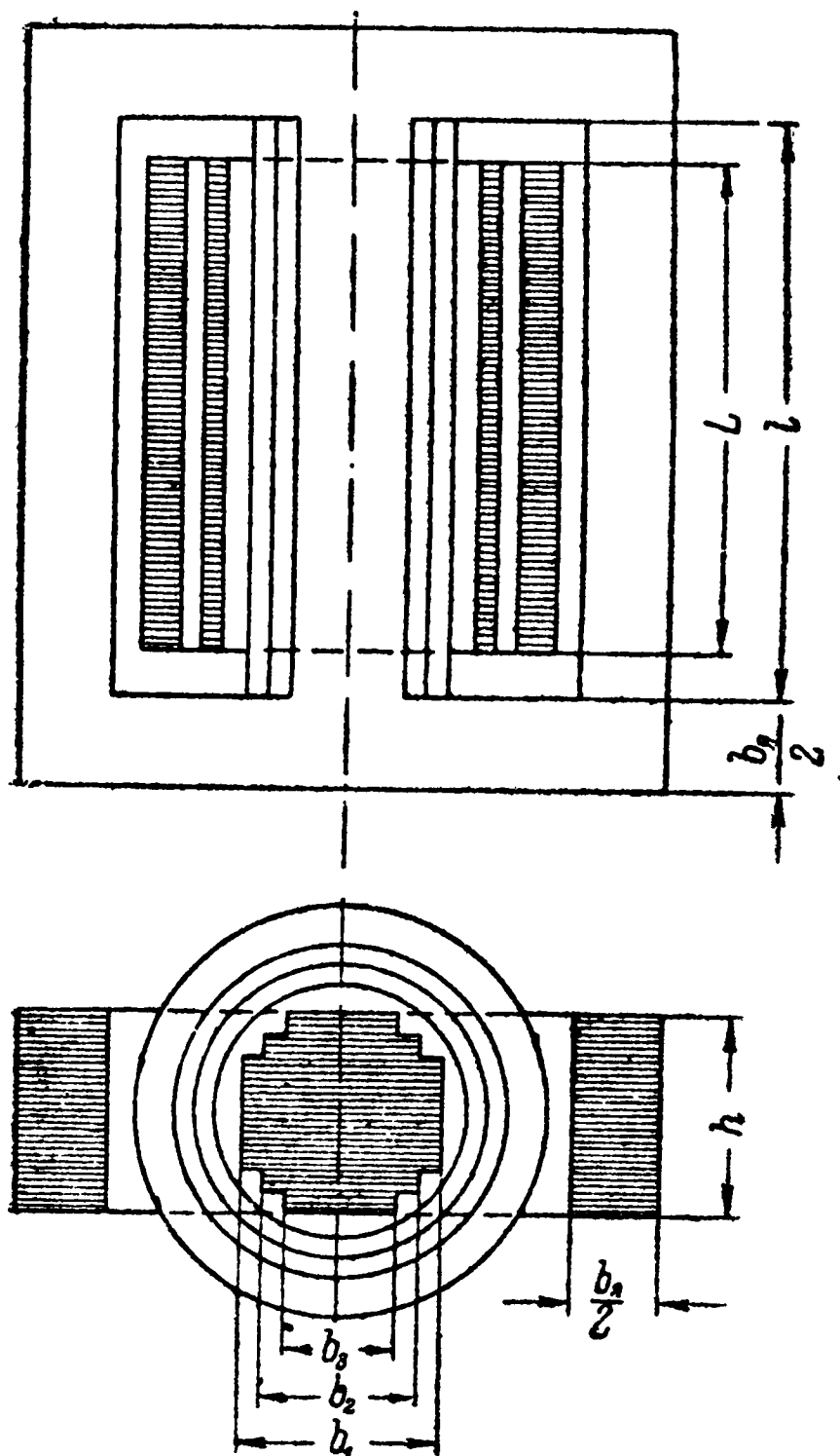


Рис. 5. Однофазный броневой трансформатор с концентрическими обмотками.

охлаждающего воздуха или масла делаются иногда в сердечнике и в обмотках *каналы*.

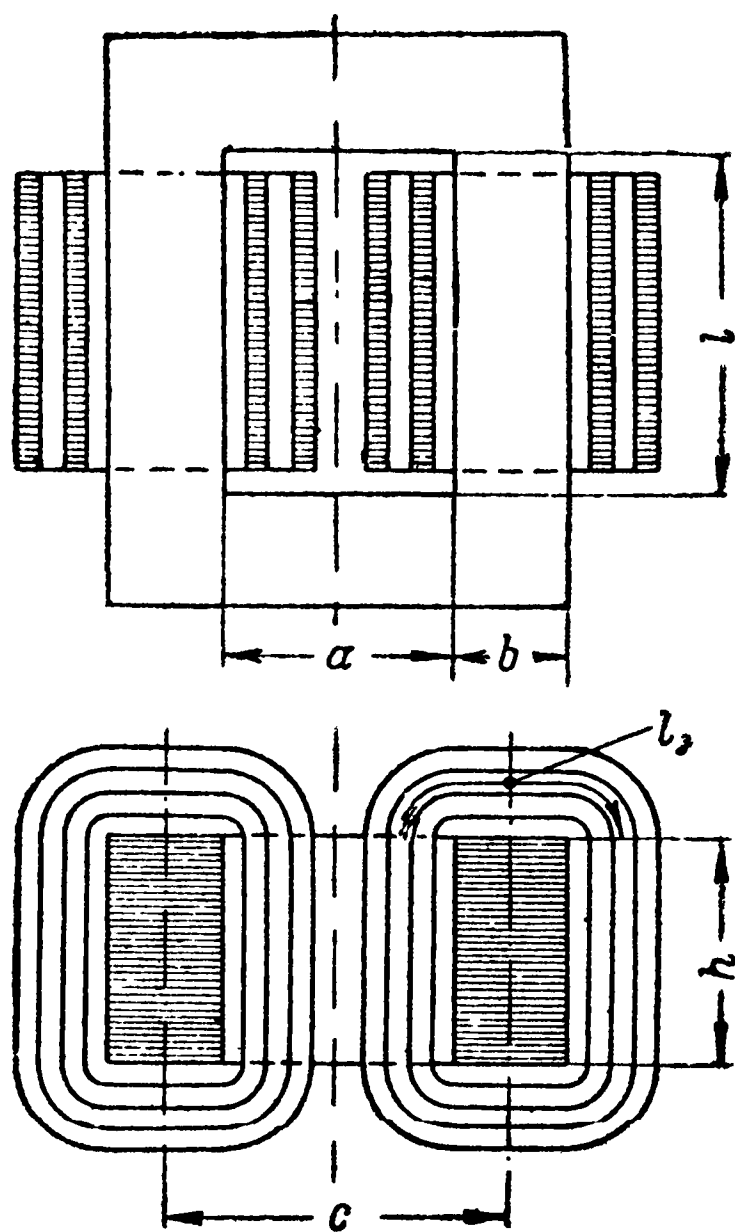


Рис. 6. Однофазный стержневой трансформатор с концентрическими обмотками и прямоугольным сечением стержней.

15. Конструктивные части, служащие для спрессовки стержней, называются *прессующими накладками*, а служащие для спрессовки ярем — *прессующими балками* или *прессующими планками*.

16. Для стягивания и прессовки листов сердечника посредством накладок и балок применяются обычно *шпильки* с нарезками, шайбами и гайками на обоих концах; реже ставят заклепки и клинья (§ 27).

17. Обычная форма сечения стержней при круглых обмотках именуется *многоступенчатой*, а именно двух-, трех- и т. д. ступенчатой, если образуется из листов двух, трех и т. д. ширины (рис. 1 и 5).

Обмотки

18. В двухобмоточном трансформаторе различают, в зависимости от напряжения, обмотку *нижнего* и обмотку *высшего* напряжения, а в зависимости от назначения (включения) — обмотку *первичную* и обмотку *вторичную*.

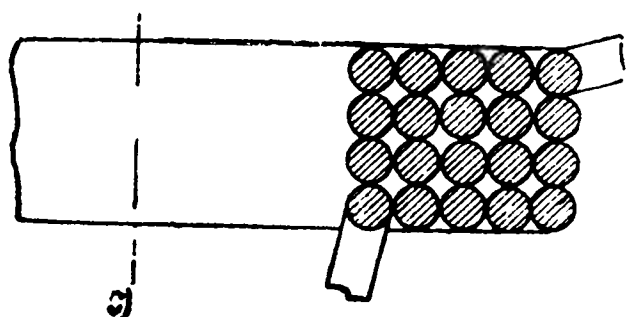
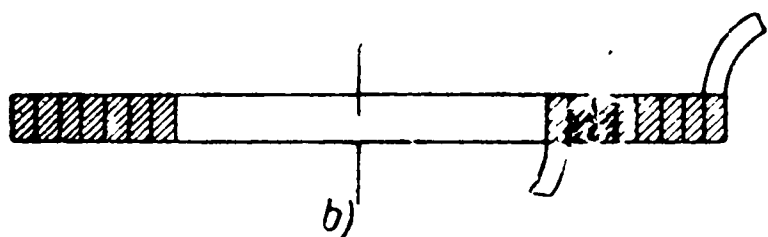
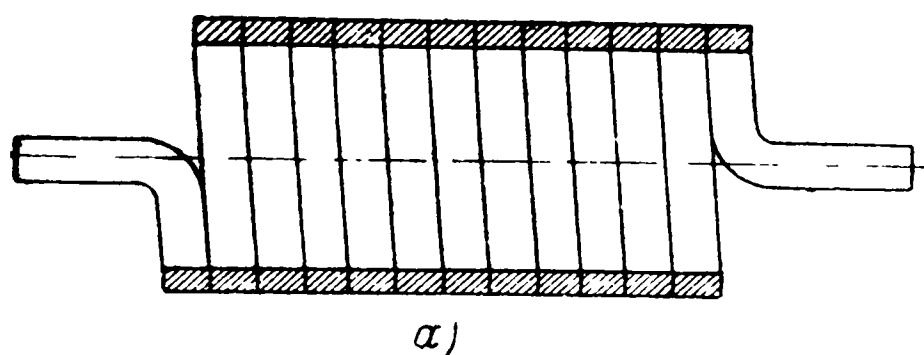


Рис. 7. Типы катушек: *a* — цилиндрическая; *b* — дисковая простая; *c* — дисковая многорядная.

если осевой размер катушки значителен по сравнению с радиальным, и последовательные витки одного слоя катушки расположены рядом, образуя цилиндрическую поверхность; однослойная, цилиндрическая катушка именуется также простой цилиндрической (рис. 7*a*); *b*) *дисковые*, если формой их является плоский диск с отверстием посередине; при этом катушки именуются *простыми дисковыми*, если каждый слой состоит из одного провода (обычно прямоугольного сечения), причем в совокупности образуется плоская спираль (рис. 7*b*), и *c*) *многорядными дисковыми*, если каждый слой состоит из многих (обычно не менее трех)

19. Обмотки предполагаются выполненными из меди; в этом смысле говорится о потерях в меди трансформатора.

20. В конструктивном отношении обмотки подразделяются следующим образом: обмотки состоят из *катушек*, катушки — из *слоев*, слои — из *витков*, витки — из *проводов*.

21. В зависимости от формы следует различать катушки: *a*) *цилиндрические*,

Примечание. При рассмотрении некоторых вопросов вводится еще понятие о *ряде* проводов, располагающихся в сечении обмотки по определенному направлению.

21. В зависимости от формы следует различать катушки: *a*) *цилиндрические*,

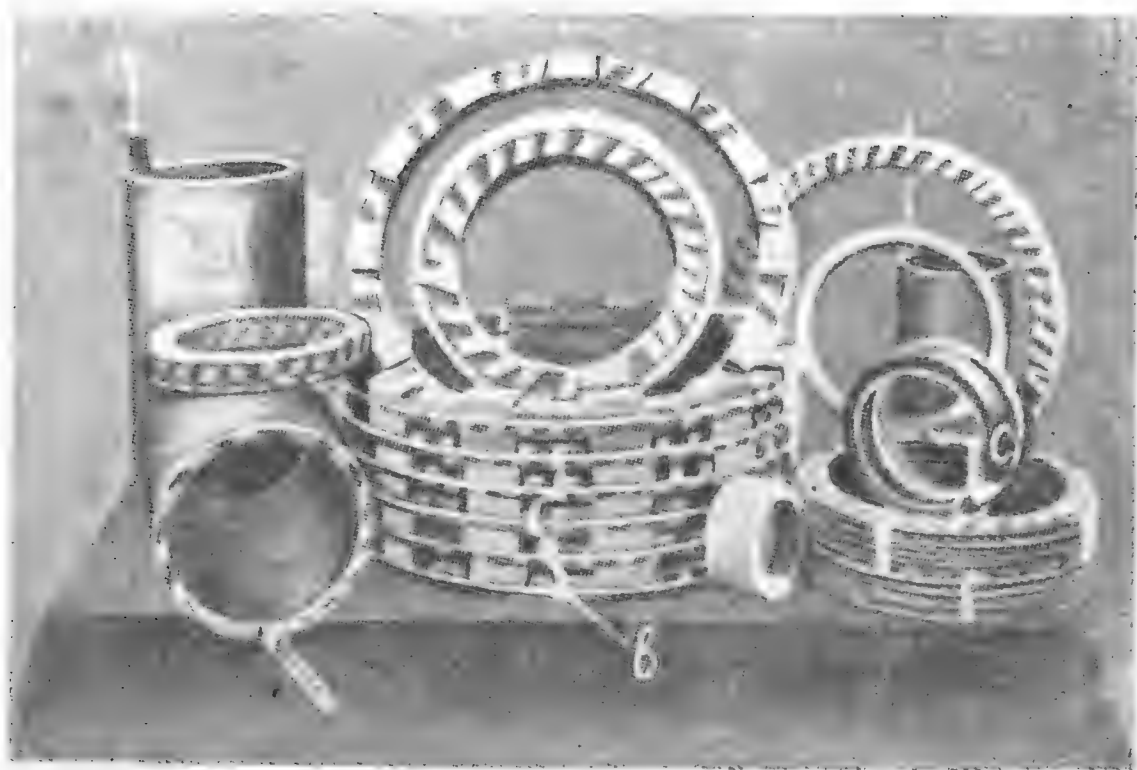


Рис. 8. Типы катушек; обозначения см. рис. 7.

проводов, обыкновенно круглого сечения (рис. 7с — катушка из пяти слоев и четырех рядов).

На рис. 8 изображены различные употребительные типы катушек; обозначения те же, что на предыдущих рисунках.

22. С точки зрения направления намотки различают катушки и обмотки *правые* и *левые*; для цилиндрической катушки эти обозначения соответствуют направлению правой и левой винтовой нарезки. Очевидно, что только правые цилиндрические катушки будут иметь направление по часовой стрелке, смотря с любого конца. Дисковые катушки будут иметь то или иное направление в зависимости от того, какой стороной они повернуты к наблюдателю.

По Правилам и Нормам все обмотки, считая от начал (например, A и a), должны иметь одинаковое направление намотки. В трансформаторах советского производства обычно применяется левая намотка; исключение см. § 36, п. 2.

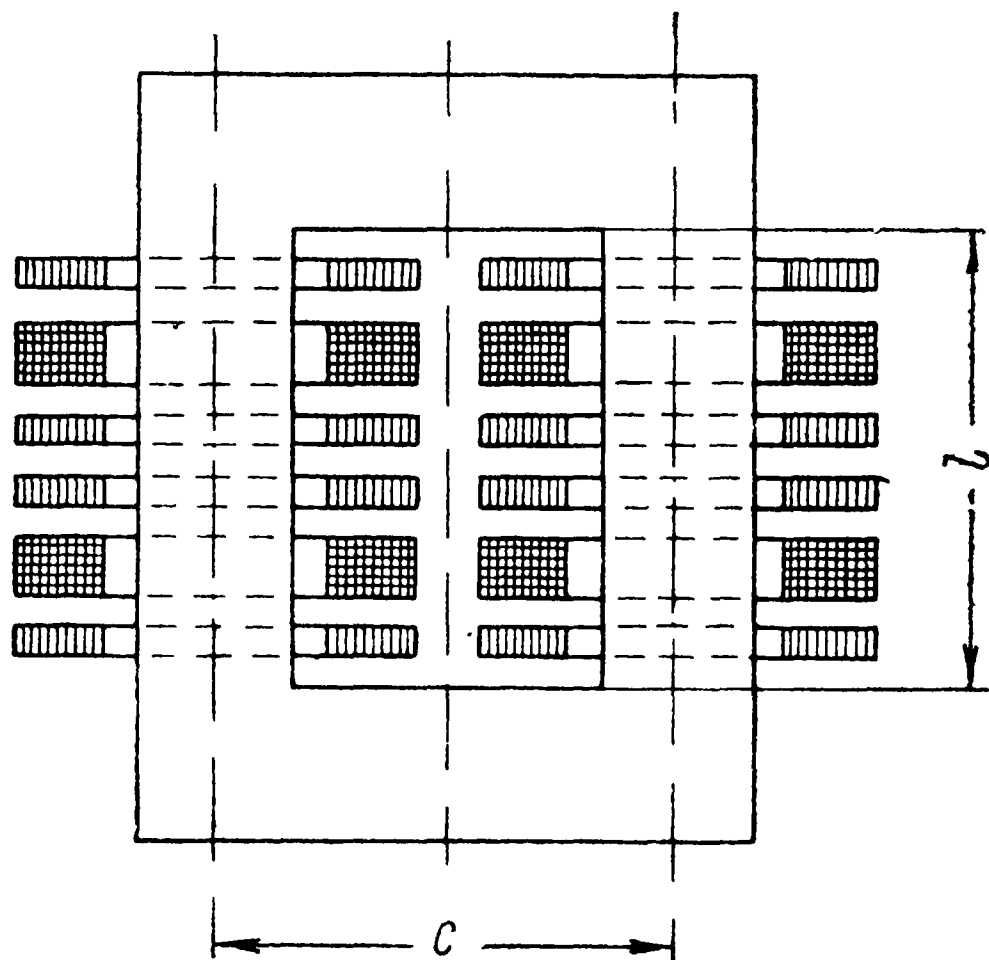


Рис. 9. Однофазный стержневой трансформатор с чередующимися обмотками.

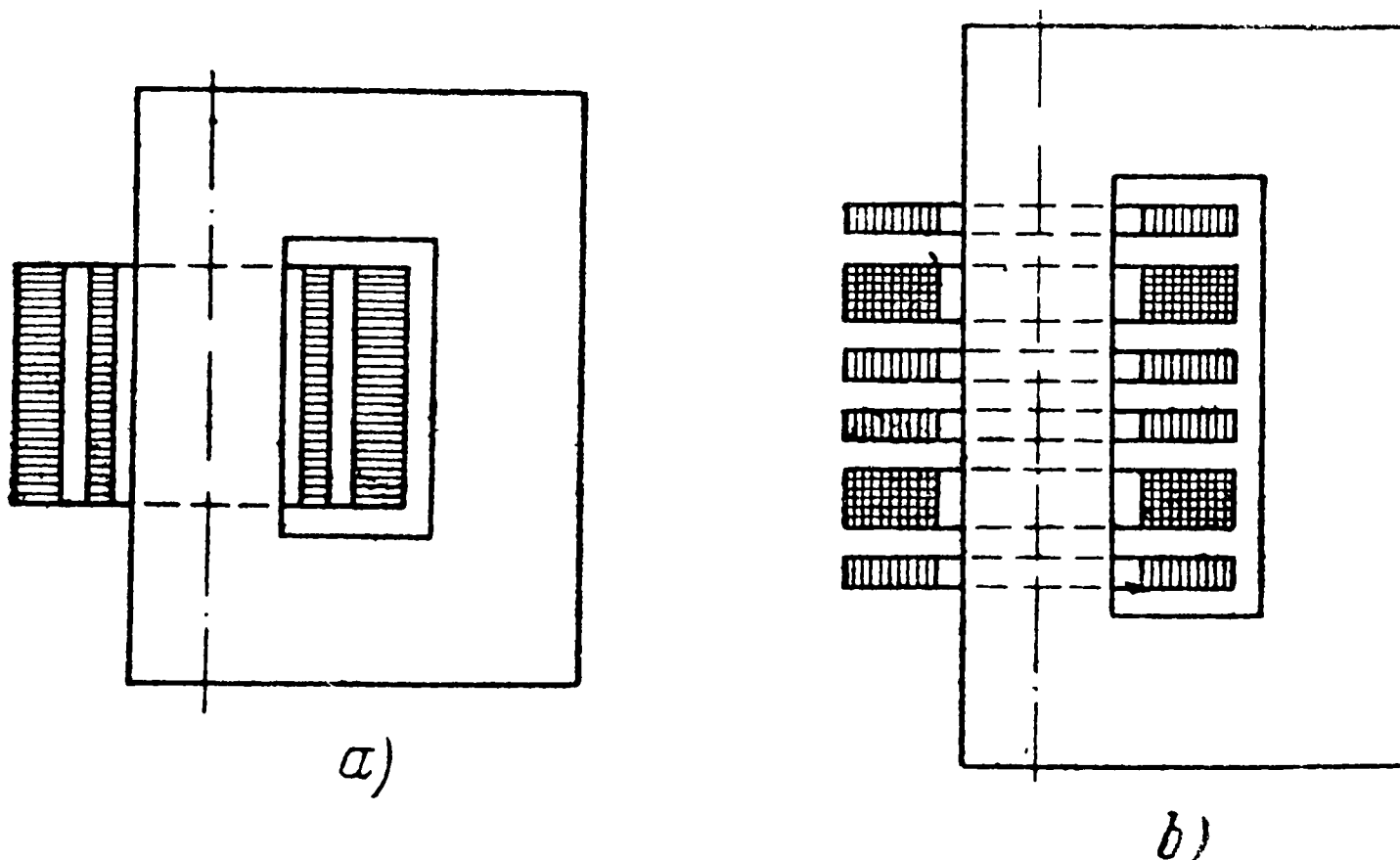


Рис. 10. Однофазный стержневой трансформатор с обмотками на одном стержне: a — обмотки концентрические; b — чередующиеся.

23. У однофазного стержневого трансформатора обмотки могут быть расположены или на двух стержнях (рис. 1, 6 и 9),

или на одном (рис. 10а и 10б); последняя конструкция применяется редко.

24. В зависимости от взаимного расположения обмоток различают:

а) *Обмотки концентрические*, т. е. расположенные концентрически относительно друг друга (рис. 1 и 2).

Примечание. Если одна из концентрических обмоток разделена на два цилиндра, помещенных: один — внутри, а другой — снаружи второй обмотки, то такая разделенная обмотка именуется *двойной концентрической* (рис. 80а).

б) *Обмотки чередующиеся* — если катушки, обычно дисковой формы, расположены вдоль общей оси с чередованием групп катушек двух или большего числа обмоток (рис. 3, 4, 9, 10 б).

25. С точки зрения конструкции или выполнения следует различать следующие формы *сложных обмоток*:

а) *Обмотки винтовые* — такие однослойные цилиндрические, у которых виток состоит из нескольких, обычно наложенных плашмя друг на друга, проводов; между витками или парами их при этом имеются каналы. Различают простую и двойную винтовые обмотки, если витки образуют соответственно простую или двухходовую винтовую линию (§ 49).

б) *Обмотки непрерывные*, т. е. состоящие из ряда дисковых катушек, наматываемых одна за другой сплошным проводом, или несколькими параллельными, при помощи специальных приемов намотки (перекладывание проводов); такая обмотка не имеет паек между катушками. Подробно см. § 48.

Примечание. Для уменьшения добавочных потерь в цилиндрических и винтовых обмотках применяются методы *тракспозиции* проводов, составляющих виток (§ 49).

26. Для выключения части витков (регулировки напряжения) обмотка выполняется с *ответвлениями* (§ 43).

27. *Симметричными* называются такие обмотки, у которых ампервитки каждой части одной из обмоток (катушки или группы катушек) компенсируются противолежащими, равными и противоположными по знаку ампервитками соответствующей части другой обмотки. В частности концентрические обмотки будут симметричны, если длины их вдоль оси равны между собой ($l_1 \approx l_2$), а витки обмоток распределены совершенно равномерно вдоль длин l_1 и l_2 ; обмотки всегда стремятся делать симметричными (исключение см. § 53, п. 2).

28. В противоположность катушкам или виткам *начальным*, присоединяемым к линии, и *конечным*, присоединяемым к нулевой точке (при соединении звездой), все остальные катушки обмотки называются *промежуточными*.

Изоляция

29. Под *изоляцией трансформатора* понимается обычно изоляция его обмоток.

30. Сообразно с подразделением самих обмоток и изоляция разделяется на изоляцию целых обмоток, изоляцию катушек, слоев, витков и проводов.

31. Изоляция обмотки высшего напряжения от другой (других) обмотки и от корпуса называется *главной изоляцией* трансформатора.

Станина

32. Совокупность деталей для укрепления сердечника и обмоток, а именно: балки, рамы, болты и пр. называется *станиной* трансформатора.

Бак и кожух

33. Если наружная оболочка трансформатора служит в качестве вместилища для масла, в которое погружена рабочая часть трансформатора, то такая оболочка называется *баком*; если же она служит только для предохранения от прикосновений к рабочей части трансформатора, то называется *кожухом*.

34. Различают следующие типы баков: а) гладкий, б) волнистый (бак с волнами), с) трубчатый (бак с трубками) и d) радиаторный (бак с радиаторами).

35. Частями бака являются: стенки, крышка, дно, тележка, а также трубки у трубчатого бака и радиаторы — у радиаторного.

Отводы

36. *Отводами* именуются провода или шины, при помощи которых в пределах трансформатора ток подводится к обмоткам, переключателям и т. п. и от них отводится (§ 44).

Изоляторы

37. *Изоляторами* (проходными) именуются изолирующие детали или устройства, при помощи которых сквозь крышку бака осуществляется подвод тока к обмоткам и прочим токоведущим частям трансформатора (§ 64).

Охлаждающая система

38. *Охлаждающей системой* трансформатора (§ 97—104) называется совокупность устройств, служащих для отведения тепла потерь трансформатора в охлаждающую среду (п. 40—44), поскольку для этого не используется сама активная часть трансформатора или же его бак.

Прочие части трансформатора

39. Вспомогательными деталями трансформатора являются: а) расширитель для масла (консерватор), б) выхлопная предохранительная труба, с) осушитель масла, d) приспособления для подъема трансформатора, е) указатели температуры, f) арматура и т. п. детали.

ОБ ОХЛАЖДЕНИИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

40. Различают трансформаторы *сухие* (с изоляцией и охлаждением активной части при помощи воздуха) и *масляные* (с изоляцией и охлаждением активной части при помощи масла).

41. У масляных трансформаторов *охлаждение масла* может производиться *воздухом* или *водой*; для сухих трансформаторов охлаждение водой (витков обмоток) применяется редко.

42. Охлаждающая среда может действовать при помощи *естественной* (тепловой) или *принудительной* (искусственной) циркуляции.

43. В соответствии с классификацией п. 40—42 различают следующие трансформаторы.

1) *Сухие*:

а) *с естественным воздушным охлаждением* (см. пример § 111),

б) *с принудительным воздушным охлаждением*.

2) *Масляные*:

а) с тепловой циркуляцией масла:

с естественным масляным охлаждением (см. пример § 110),
с добавочным обдуванием (§ 102),

с внутренним водяным охлаждением (§ 103);

б) с принудительной циркуляцией масла через *отдельный охладитель* (§ 104).

44. Охладители бывают:

1) *радиаторного типа* (охлаждающая среда — воздух):

а) с естественным воздушным охлаждением,

б) с принудительным обдуванием воздухом;

2) *трубчатого типа* (охлаждающая среда — вода);

3) *змеевикового типа* (охлаждающая среда — вода, в которую погружен змеевик с циркулирующим по нему маслом).

ГЛАВА II

КРАТКИЙ ОБЗОР КОНСТРУКЦИЙ И ПРОИЗВОДСТВА ТРАНСФОРМАТОРОВ

§ 3. Примеры конструкций трансформаторов

Общее описание современных достижений в области трансформаторостроения (преимущественно мощных высоковольтных трансформаторов) см. [Л. 25—32]; для самого быстрого, но совершенно необходимого ознакомления с конструкциями ниже приведены описания, а в приложениях — чертежи трех разных трансформаторов, расчеты которых даны в примерах 1—3 (§ 110—112).

1. Чертеж I изображает два разреза и вид в плане нормального стержневого трансформатора с естественным масляным охлаждением фирмы Бергман (Bergmann), 50 kVA, 10000/400V,

схема соединения Y/Y_0 , 50 Hz. В плане даны: справа — вид на крышку сверху, а слева — разрез поперек стержня с обмотками. Ниже перечислены важнейшие части этого трансформатора.

а. Магнитная цепь состоит из трех стержней *1* и верхнего и нижнего ярма 2_I и 2_{II} ; сечение стержней и ярма — трехступенчатое; сборка листов — внахлестку; расположение стержней обычное, вертикальное; крепление всего сердечника — четырьмя прессующими деревянными накладками *3* и восьмью шпильками *4*, из которых лишь 4 средних проходят сквозь активную сталь сердечника; ¹ стержни не имеют вовсе шпилек и после сборки сердечника скрепляются лентой перед насадкой обмоток.

б. Обмотки — концентрические с обычным расположением, ближе к стержню — двухслойная катушка обмотки низшего напряжения *5*; обмотка высшего напряжения *6* — из десяти катушек на фазу, намотанных между изолирующими шайбами *7* на изолирующий цилиндр *8*, разделяющий обе обмотки; осевые опоры *9* обеспечивают изоляцию обмоток от ярма и достаточное сжатие их в осевом направлении; отводы от обмоток к изоляторам не показаны для упрощения чертежа. *10* — переключатель.

с. Бак трансформатора *11* с волнами, создающими достаточную поверхность охлаждения (§ 99); для простоты изготовления крышка *12* бака чугунная, литая; на ней смонтированы изоляторы высшего *13* и низшего *14* напряжения, а также консерватор *15* (§ 58); ушки *16* на крышке служат для подъема всего трансформатора с баком. Судя по гладким, без юбок, изоляторам, трансформатор предназначен для внутренней установки.

Детальный расчет этого трансформатора см. пример 1, § 110; там же схема обмоток.

2. На чертеже II изображен трехфазный стержневой трансформатор с воздушным охлаждением конструкции завода Электрик, 50 kVA, 500/230 — 115 V, 50 Hz. Сердечник *1* этого трансформатора имеет стержни с двухступенчатым сечением; для ярем выбрана прямоугольная форма. Сборка сердечника внахлестку; прессовка ярем производится швеллерами *2*, причем в верхнем швеллере сделаны овальные (в вертикальном направлении) отверстия для трех прессующих шпилек. Стержни не имеют вовсе шпилек и спрессовываются клиньями и внутренней (первичной) обмоткой *3*, имеющей между двумя слоями кольцевой охлаждающий канал. Снаружи расположена вторичная обмотка *4* с многочисленными ответвлениями для регулировки напряжения согласно схеме. Отводы подведены к клеммовой доске *5*, но для простоты на чертеже не указаны. Для подъема трансформатора служат два кольца *6*.

¹ Обычно у трехфазных стержневых трансформаторов в ярмах ставят лишь три шпильки, по одной против каждого стержня.

Детальный расчет этого трансформатора см. пример 2, § 111; интересно сравнить расчетные данные этого трансформатора с соответствующими данными примера 1.

3. На чертеже III даны продольный и поперечный разрезы однофазного стержневого трехобмоточного трансформатора конструкции МТЗ (Москва) с мощностями отдельных обмоток 5000, 3000/3000 kVA, $110/\sqrt{3}/33/\sqrt{3}/6,6$ kV, 50 Hz с естественным масляным охлаждением. Устройство важнейших частей этого трансформатора следующее.

а. Конструкция сердечника 1 характерна для однофазного трансформатора такого типа большой мощности. Вся магнитная цепь разделена на шесть частей охлаждающими каналами: одним, идущим поперек ширины листов и разделяющим сердечник на две концентрические рамы, и двумя продольными, проходящими вдоль листов как в стержнях, так и в ярах. Крепление стержней обеспечивается шпильками 2 и накладками 3, а обоим ярам — прессующими балками 4_I и 4_{II} („станина“) и по углам — четырьмя шпильками 5 и четырьмя квадратными брусками 6; последние заложены в квадратные пазы, выштампованные в соответствующих местах листов стержней и ярем; в эти бруски ввернуты болты, сжимающие станину вместе с сердечником (§ 107).

б. Обмотки этого трехобмоточного трансформатора расположены на стержнях в такой последовательности (чертеж IV): ближе всего к сердечнику — обмотка 7 на 6,6 kV, затем — обмотка 8 на $33/\sqrt{3}$ kV; снаружи лежит обмотка 9 на $110/\sqrt{3}$ kV; детали см. чертеж IV.

в. Изоляция этого, сравнительно высоковольтного, трансформатора выбрана довольно солидной; „главная“ изоляция (§ 2) состоит из двух изолирующих цилиндров 10_I и 10_{II} , помещенных между обмотками 9 и 8, и из шайб угловых 11 и простых 12, обеспечивающих изоляцию обмотки 9 от ярем. Кроме того, между обмотками 7 и 8, равно как между обмоткой 7 и стержнем, поставлено тоже по изолирующему цилиндру 13 и 14; отводы высшего напряжения 15 имеют сильную изоляцию из кембрика и бумаги.

Сварной бак 16 из котельных листов, толщиной 10 мм, снабжен съемными радиаторами 17. На крышке расположены: два изолятора 18 на 110 kV, два (19) на 35 kV, два (20) на 6 kV и консерватор 21; выпускная предохранительная труба 22 служит против внезапного повышения давления в баке. Бак снабжен солидной тележкой 23 для передвижения трансформатора. Активная часть трансформатора не прикреплена к крышке, а стоит на дне бака; для предупреждения шатания трансформатора в баке служат угольники 24.

Трансформатор этот предназначен для наружной установки, что видно по типу примененных изоляторов.

Расчет трансформатора см. пример 3, § 112; там же схема обмоток.

§ 4. Краткие сведения о производстве трансформаторов

Производство трансформаторов состоит из ряда взаимно независимых операций для заготовки разнохарактерных деталей трансформатора и последующей сборки всего трансформатора из этих деталей; конечной стадией производства является испытание, а затем упаковка и отправка трансформаторов. Важнейшими заготовительными операциями являются следующие.

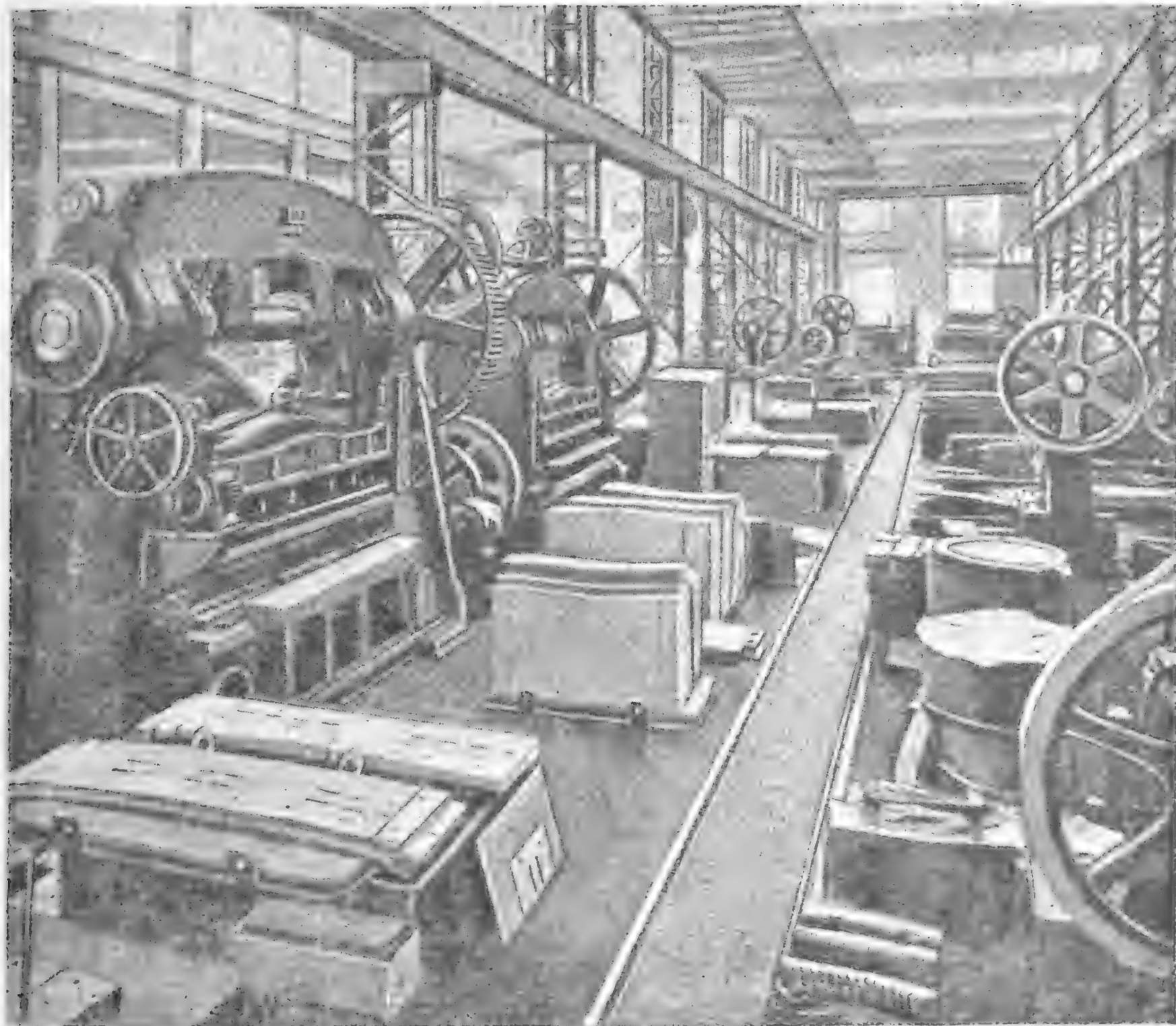


Рис. 11. Штамповочный цех большого трансформаторного завода.

1. Заготовка деталей сердечника и сборка его. Листы для сборки сердечника заготавливаются из стандартных листов электротехнической стали (ОСТ 6301) путем одного из двух процессов в зависимости от применяемого метода изоляции листов.

При бумажной изоляции после наклейки на листы бумаги толщиной 0,03 мм (на специальной машине с подогревом) листы разрезают на гильотинных ножницах согласно требующимся для сердечника размерам; если нужны отверстия, они проштамповываются (добавочная операция). Рис. 11 дает понятие о штамповочном цехе большого трансформаторного завода.

При массовом производстве малых трансформаторов вме-

сто разрезки листов применяют штамповку компаундными штампами, при которой сразу получаются листы для сердечника со всеми необходимыми отверстиями. Во всех случаях стремятся к тому, чтобы заготовки для сердечника выкраивались вдоль стандартных листов, так как в этом направлении качество стали лучше. Затем с заготовленных листов обязательно снимаются заусенцы (обычно путем шлифовки). При резке и штамповке листов качества стали ухудшаются и могут быть восстановлены посредством отжига при температуре 850°C , что конечно отпадает при бумажной изоляции листов.

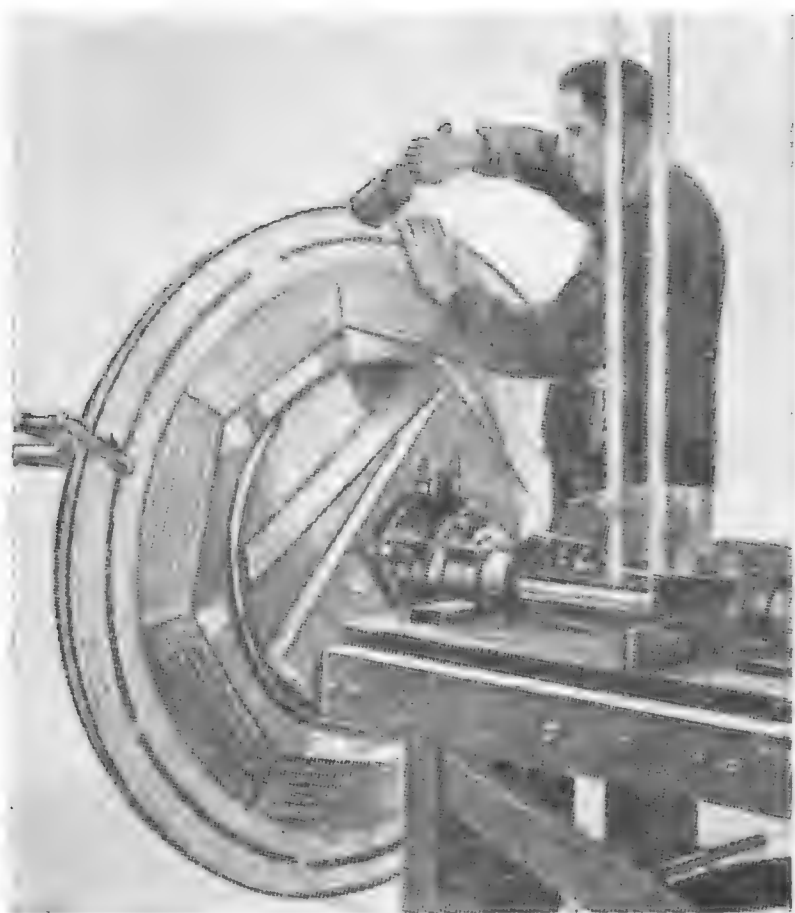


Рис. 12. Намотка дисковой катушки мощного трансформатора.

Поэтому по второму способу процесс начинается с резки и штамповки, после чего листы поступают в отжиг в специальных электрических печах, в атмосфере азота и водорода. После этого листы поступают на лакировальную машину, где покрываются с обеих сторон специальным лаком; лак запекается, и после остывания листы идут в сборку. Подробно о сборке сердечников см. § 28.

2. Заготовка катушек для обмоток. Эти работы производятся в обмоточном цехе на специальных обмоточных станках. В зависимости от типа катушек (§ 2, п. 21) намотка производится на соответствующих разборных оправках (шаблонах);

катушки по рис. 61 и 62 наматываются прямо на изолирующий цилиндр, устанавливаемый на обмоточном станке. Небольшие катушки наматываются так, что провод (или провода) поступает с барабана (или барабанов) к обмотчику спереди, поверх оправки, на которую производится намотка, обмоточный же станок вращается в сторону обмотчика. Для больших обмоток, когда производится добавочная изоляция витков или транспозиция проводов (§ 49), удобнее пустить провод (или провода) со стороны обмотчика. На рис. 12 показана намотка дисковой катушки (§ 46) мощного трансформатора. Если обмотка состоит из ряда отдельно наматываемых катушек, то производится сборка из них обмотки всей фазы (рис. 13). После этого обмотка просушивается и пропитывается лаком в специальных пропиточных установках, а затем поступает на сборку всего трансформатора.

3. Заготовка изоляции. При большом производстве для заготовки изоляции имеется изоляционный цех со специальным оборудованием (ножницы, пресса, штампы, машины для склейки и т. д.) для производства и обработки деталей из пресшпана, фибры и пр. В этом цехе изготавливаются также отводы со всей

их изоляцией. Идущий в производство пресшпан иногда заранее пропитывается лаком или маслом, иногда же пропитываются готовые изоляционные детали. Деревянные детали изготавливаются в столярных цехах из просушенного и пропитанного маслом дерева. Изделия из бакелизированной бумаги (доски, цилиндры, трубки, прокладки) являются обычно продукцией специальных изоляционных заводов.

4. Заготовка баков и станин трансформаторов.

Цех для изготовления этих деталей подобен котельному цеху и имеет необходимое, часто очень мощное, оборудование для правки, строжки, загибания и сверления больших листов, а также подготовки труб для трубчатых баков. В этом же цехе производится сварка всего бака — электрическая при толстых листах и автогенная — при тонких (волнистые баки). Тут же изготавливаются крышки, тележки баков и детали станины из балок, уголков, листов, полос и т. д.

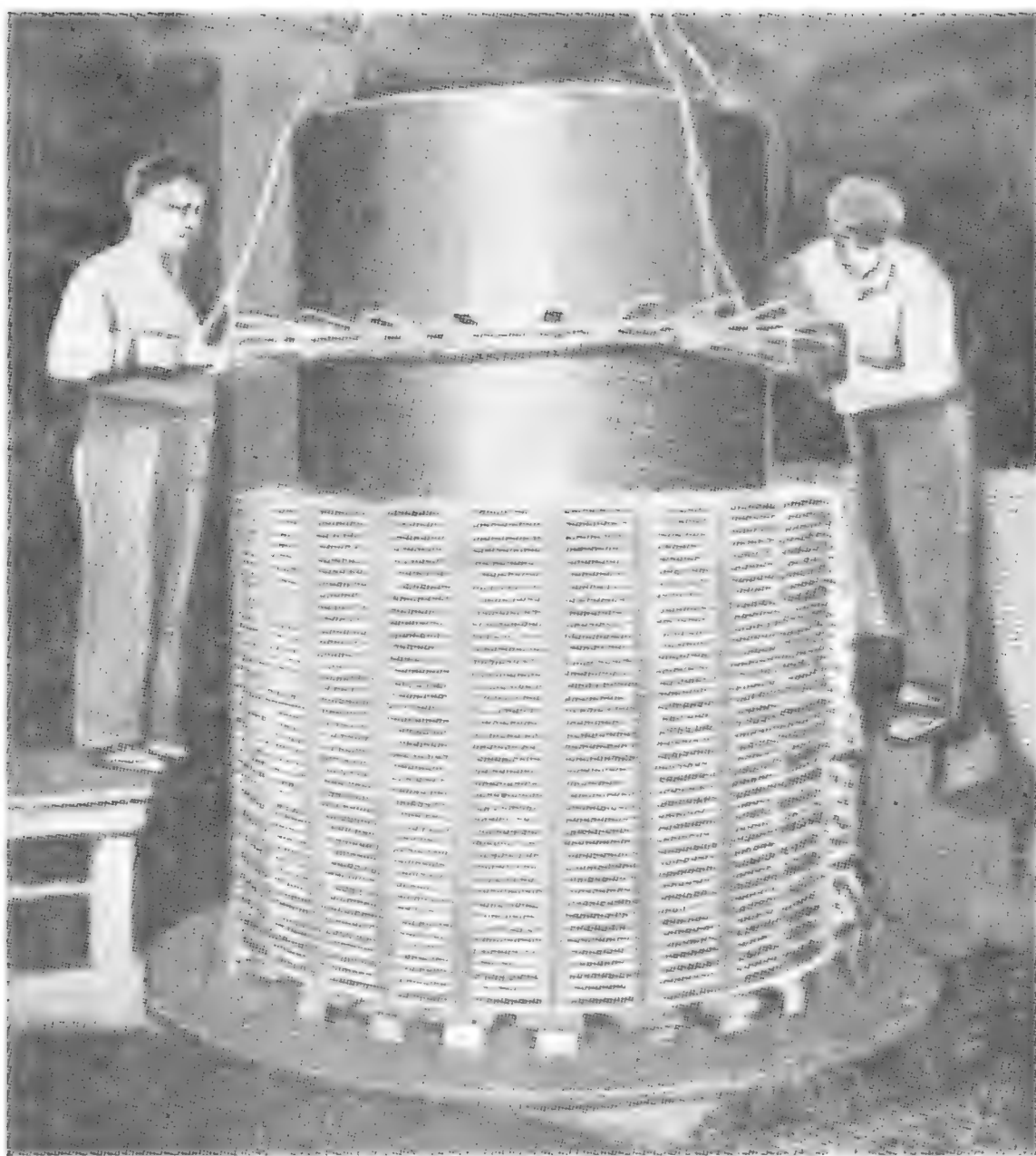


Рис. 13 Сборка обмотки из парных дисковых катушек на заводе ГЕСо.

5. Сборка трансформаторов. При сборке сердечников внахлестку (§ 28) их обычно собирают целиком, что облегчает работу; для насадки обмоток у поставленного вертикально сердечника разбирается верхнее ярмо, и на стержни наматываются обмотки с их изоляционными деталями (шайбы, цилиндры и т. д.), после чего верхнее ярмо зашихтовывается обратно. В трансформаторах броневое типа при сборке внахлестку сначала собираются в вертикальном положении обмотки, а затем вокруг них по листам собирается сердечник. При сборке сердечников впритык (§ 28) сказанное о расшихтовке и зашихтовке верхнего ярма конечно отпадает, и активная часть трансформатора прямо составляется из отдельных, заранее собираемых частей сердечника, а также обмоток трансформатора, причем все скрепляется мощной станиной.

В зависимости от мощности трансформаторов и объема всего производства, сборка может вестись различно. Для мелких трансформаторов например — на конвейере, в небольших сравнительно помещениях. Но для сборки мощных трансформаторов требуются обширные цеха (рис. 14) с мощными кранами, большими вакуумными печами и т. п.

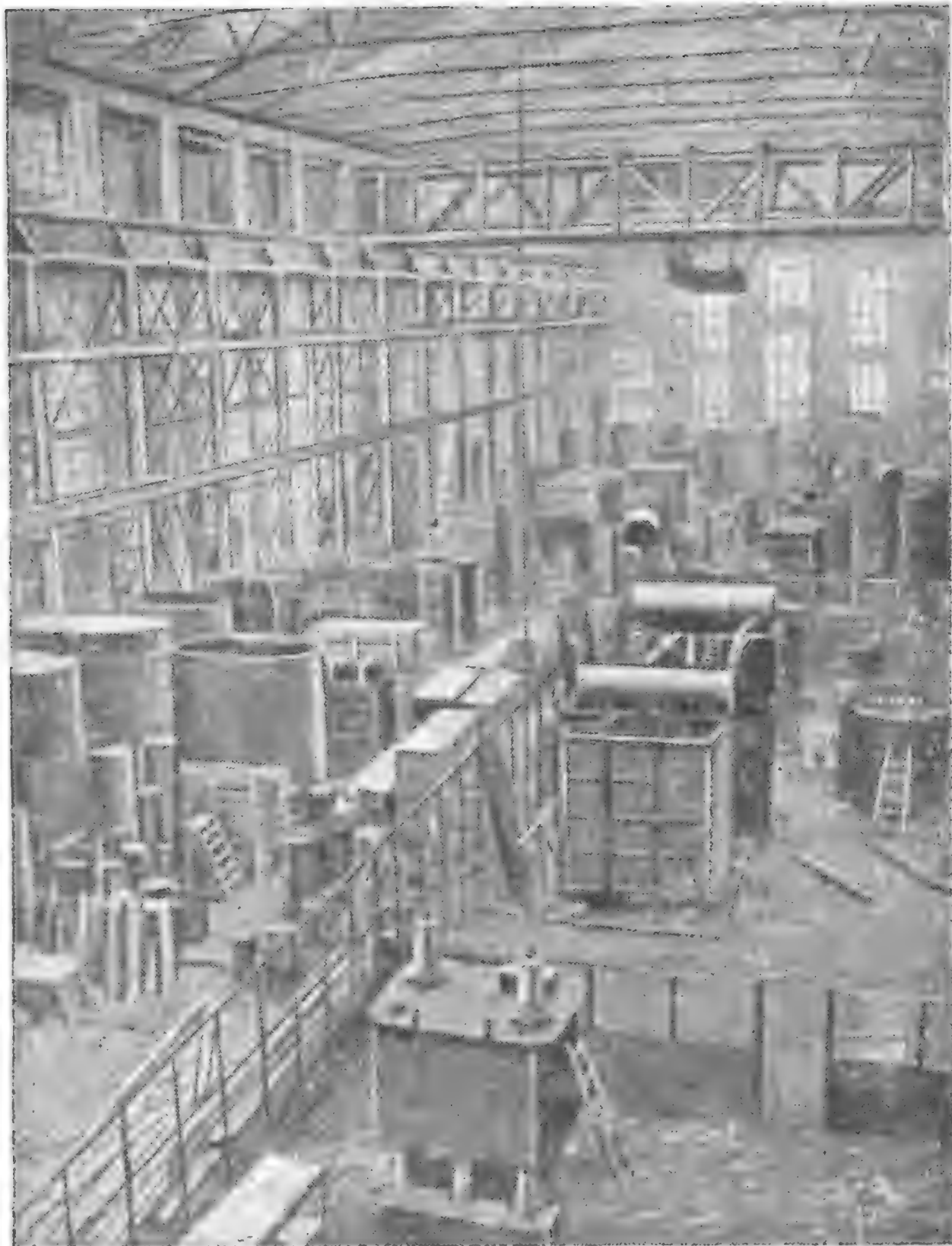


Рис. 14. Ссрочный цех мощных трансформаторов на МТЗ.

6. Испытания и отправка. Собранный и вполне готовый трансформатор проходит все необходимые испытания в специальном испытательном отделе, являющемся наиболее ответственным цехом трансформаторного производства, после чего упаковывается и отправляется.

ГЛАВА III

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

§ 5. Основное задание

Расчетные величины и все данные по расчету трансформатора можно разделить на три группы:

А) основные величины, непосредственно задаваемые,

В) величины и данные, подразумевающиеся само собой (если о них нет особых указаний),

С) величины, о которых проектирующему приходится договариваться особо или же выбрать по собственному усмотрению с достаточной, конечно, мотивировкой.

К основным, непосредственно задаваемым, величинам принадлежат следующие.

1. m — число фаз.

2. P — номинальная мощность в киловольтамперах или вольтамперах.

3. U_1 и U_2 — номинальные напряжения, понимаемые обычно при холостом ходе, если не сделано специальной оговорки о том, что эти напряжения заданы для другого режима работы, например при 1/1 (полной) нагрузке и $\cos \varphi_2 = 0,8$. Иногда прямо задается величина коэффициента трансформации:

$$k_{12} = U_{1\phi} / U_{2\phi};$$

при холостом ходе:

$$k_{12} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} \approx \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (1)$$

4. Частота f в герцах.

5. Схема соединений всех обмоток трансформатора; для трехфазного трансформатора указывается „группа“ соединений (§ 16).

6. Система охлаждения.

Величинами, или вернее условиями, обычно подразумеваемыми (если не сделано особой оговорки), являются следующие.

7. Соответствие рассчитываемого трансформатора существующим правилам и нормам.

8. Режим работы — обычно длительная нагрузка, или ПКР = 100% (повторно-кратковременный режим), если не указан другой процент для этой величины (§ 22).

9. Обычно при расчете тип трансформатора может считаться известным или заданным; заказчик трансформатора редко не интересуется этим вопросом. Вопросу о выборе типа трансформатора посвящен § 16.

Вышепереименованные величины, однако, недостаточно определяют трансформатор; необходимо иметь еще следующие данные.

10. e_k % — величина напряжения короткого замыкания (§ 77). Величина эта определяет, как известно, основные свойства трансформатора в отношении параллельной работы его с другим (или другими) заданным трансформатором, определяет изменение напряжения при нагрузке; эта же величина e_k , вернее связанная с ней величина $e_s = \sqrt{e_k^2 - e_r^2}$, находится в прямой зависимости от соотношений между основными размерами трансформатора (§ 53). Вот почему величина e_k должна быть прямо включена в основное задание путем договоренности с заказчи-

ком или же должна быть выбрана самим проектирующим с достаточной осмотрительностью. На важность введения в расчет этой величины указано впервые автором [Л. 33—35].

11. η % — к. п. д. трансформатора; вместо непосредственного задания величины η может быть поставлено условие, чтобы трансформатор удовлетворял какому-либо, наперед заданному, технико-экономическому принципу, например, был бы построен с минимальной затратой активных материалов, с минимальной стоимостью годовых потерь, с минимальной стоимостью общих расходов по эксплуатации и т. п. В § 10 указано, какие именно величины определяют в основном экономику трансформатора.

§ 6. Основные этапы развития методов расчета трансформаторов

Общей и полной теории расчета трансформаторов, собственно говоря, пока не существует; имеется лишь довольно многочисленный ряд предложенных методов расчета. О некоторых из них ниже вкратце дано представление, чтобы показать все разнообразие возможных подходов к расчету и проектированию трансформаторов.

Классическими в этой области были работы теоретиков последнего десятилетия прошлого и первого десятилетия нашего столетия, а именно Арнольда (Arnold), Каппа (Kapp), Пикельмайера (Pichelmayer), Роговского (Rogowski) и др.

Классические методы, сыгравшие в свое время большую роль для выяснения основных соотношений в трансформаторах, являются теперь чрезмерно обобщенными и не учитывают (да и не могут учитывать) изменяющихся условий действительности и всех практических требований, предъявляемых к трансформаторам. Несколько академичным являлось и самое задание по расчету трансформатора, заключавшее в себе обычно лишь п. 1—8 (§ 5).

В дальнейшем, с двадцатых годов, появилось много работ М. Видмара (M. Vidmar), который вводил в расчет им же сформулированные закономерности в области расчета трансформаторов и законы технико-экономического порядка. С тех пор можно отметить появление в печати большого числа статей, где предлагались самые разнообразные методы расчета, часто весьма остроумные, но еще чаще довольно формальные, за основу которых принимали по усмотрению какой-либо один из принципов расчета, а остальными пренебрегали.

В последнее время, примерно с 1925 г., стали появляться работы теоретиков, практически работающих в данной области (проф. Г. Н. Петров и др.) [Л. 36—45]. Благодаря этому теория расчета трансформаторов начала становиться на твердую почву действительности с учетом факторов статистики и экономики, а не только электротехники и математики.

§ 7. Расчет трансформаторов по Арнольду

Основной расчетной величиной трансформатора является витковое напряжение e_w . Арнольд в своем классическом труде по трансформаторам [Л. 11] дает простой вывод основной расчетной формулы не для величины e_w , но для связанной с ней величины сечения стержня S , причем приведен вывод для однофазного стержневого трансформатора. Для трехфазного вывод будет следующий.

Мощность трехфазного трансформатора:

$$P = 3 \cdot E_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot 10^{-3} \text{ kVA}, \quad (2)$$

или, вводя значение э. д. с.:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot \omega \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ V}, \quad (3)$$

$$P = 3 \cdot 4,44 \cdot f \cdot \omega \cdot \Phi \cdot I_{\phi} \cdot 10^{-11} \text{ kVA}.$$

$$\text{Но } \Phi = B \cdot S, \text{ причем пусть } B_{\alpha} = B \quad (4)$$

$$\text{и } I_{\phi} = \Delta \cdot S_m, \text{ причем } \Delta_1 = \Delta_2 = \Delta. \quad (5)$$

Здесь S — сечение стержня в кв. сантиметрах, S_m — сечение обмотки в кв. миллиметрах, а Δ — плотность тока в амперах на кв. миллиметр.¹ Для простоты предположим, что обмотки чередующиеся. Тогда средние длины витков обмоток будут одинаковы, а при равенстве ампервитков в обеих обмотках и при одинаковых Δ будут равны и веса обеих обмоток.

Из равенств (2) — (5) получается:

$$P = 3 \cdot 4,44 \cdot f \cdot \omega \cdot B \cdot S \cdot \Delta \cdot S_m \cdot 10^{-11} \text{ kVA}. \quad (6)$$

При неусиленном ярме, т. е. при $k_{\alpha} = 1$ и $S_{\alpha} = S$, вес сердечника: $G_c = S \cdot l_c \cdot \gamma_c \cdot 10^{-3} \text{ kG}$, вес обмоток: $G_m = 2 G_{m1} = 2 G_{m2} = 2 \cdot \omega \cdot S_m \cdot l_m \cdot \gamma_m \cdot 10^{-5} \text{ kG}$, где l_c — общая длина всех частей сердечника в сантиметрах, γ_c — удельный вес материала сердечника, γ_m — удельный вес материала обмотки, l_m — общая длина электрических цепей всех фаз трансформатора, в данном случае — утроенная средняя длина l_w витков обеих обмоток: $l_m = 3 l_w$, причем

$$l_w = \frac{l_{w1} + l_{w2}}{2} \text{ cm}. \quad (7)$$

Отношение:

$$\psi = \frac{G_c}{G_m} = \frac{S \cdot l_c \cdot \gamma_c \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \omega \cdot S_m \cdot l_m \cdot \gamma_m \cdot 10^{-5}}.$$

Так как для трансформаторной стали $\gamma_c = 7,6$ (ОСТ 6391), а $\gamma_m = 8,9$,

$$\text{то } \psi = \frac{42,4}{\omega} \cdot \frac{S}{S_m} \cdot \frac{l_c}{l_m} \quad \text{и} \quad S_m = \frac{42,4}{\omega} \cdot \frac{S}{\psi} \cdot \frac{l_c}{l_m}.$$

¹ Прочие обозначения см. в конце книги.

Подставляя это значение в формулу (6), находим:

$$P = 3 \cdot 4,44 \cdot f \cdot w \cdot B \cdot S \cdot \Delta \cdot \frac{42,4}{w} \cdot \frac{S}{\psi} \cdot \frac{l_e}{l_m} \cdot 10^{-11} \text{ kVA},$$

откуда

$$S = \sqrt{\frac{10^2}{3 \cdot 4,44 \cdot 42,4} \cdot \frac{l_m}{l_e}} \cdot \sqrt{\frac{P \cdot \psi \cdot 10^9}{f \cdot B \cdot \Delta}} = C_3 \sqrt{\frac{P \cdot \psi \cdot 10^9}{f \cdot B \cdot \Delta}} \text{ см}^2. \quad (8)$$

По Арнольду для стержневых трехфазных трансформаторов постоянная $C_3 = 0,37$ при круглых катушках и $0,47$ при прямоугольных, теперь редко применяемых.

Как видно, расчет Арнольда является сильно упрощенным, поскольку для всех случаев дается одно и то же значение C_3 без учета требующейся реактивности трансформатора, вопросов экономики и т. д.

Из формулы (8) следует, что при заданных P и f , а также при выбранных B и Δ будет $S \equiv \sqrt{\psi}$.

Реличину ψ не легко выбрать, но, во всяком случае, следует выбирать ее с учетом современных условий (изменение свойств трансформаторной стали со времен Арнольда, изменение свойств самих трансформаторов и т. д.).

У современных, правильно подсчитанных трансформаторов веса стержней и ярем примерно равны (§ 10), а значит, при одинаковых сечениях стержней и ярем:

$$l_e = 3l + 2l_y \approx 6l,$$

где l — длина стержня, а l_y — длина ярма; кроме того $l_m = 3l_w$ (см. выше).

Поэтому:

$$C_3 = \sqrt{\frac{10^2 \cdot 3 l_w}{3 \cdot 4,44 \cdot 42,4 \cdot 6 \cdot l}} = 0,297 \sqrt{\frac{l_w}{l}}.$$

Для современных трансформаторов можно считать [Л. 38]:

$$\frac{l_w}{L} \approx 1,5 \div 1,7.^1$$

Учитывая изоляционные расстояния l_0 от обмоток до ярма (рис. 105), имеем осевую длину обмоток $L = l - 2l_0$,² причем $L \approx (0,8 \div 0,9) l$.

При $L = 0,8 l$ имеем $\frac{l_w}{0,8 l} = 1,7$ и $\frac{l_w}{l} = 0,8 \cdot 1,7 = 1,36$.

¹ Следует иметь в виду связь между отношением l_w/L и значением $\psi = G_c/G_m$. Из-за стремления к экономии меди приходится увеличивать сечение S сердечника, а значит и вес его. При увеличении G_c и уменьшении G_m увеличивается ψ . Но увеличение S ведет к увеличению l_w , а следовательно и отношения l_w/L . Поэтому у некоторых наших трансформаторов это последнее отношение доходит сейчас до 2.

² Вообще $L = \frac{l_1 + l_2}{2}$; в данном случае принимается $l_1 = l_2$.

Тогда $C_3 = 0,297 \sqrt{1,36} = 0,345$. При $L = 0,9 l$ имеем $C_3 = 0,367$.

У однофазных трансформаторов число активных стержней s может быть равно 2 (рис. 1, 6 и 9) или 1 (рис. 5 и 10). Очевидно [см. формулу (8)], что соответствующие постоянные Арнольда C_2 и C_1 для этих трансформаторов будут связаны с постоянной C_3 соотношением:

$$C_3 : C_2 : C_1 = 1 : \sqrt{\frac{3}{2}} : \sqrt{3} = 1 : 1,225 : 1,731.$$

Если принять для C_3 вышеприведенное значение 0,345, то для C_2 получится 0,425, а для C_1 — 0,6.

Чем выше напряжение трансформатора, тем больше следует выбирать величину C для снижения числа витков; напротив, чем больше требуемое значение e_k , тем меньше нужно брать величину C . Для предварительных расчетов постоянную C можно выбирать в следующих пределах в зависимости от типа трансформатора (со ступенчатыми стержнями).

Тип трансформатора	C
Стержневой трехфазный . . .	0,3 ÷ 0,37, в среднем 0,34
„ однофазный ($s = 2$)	0,4 ÷ 0,45 „ 0,2
„ „ ($s = 1$)	0,55 ÷ 0,65 „ 0,66

Постоянная C дана несколько меньшей, чем у Арнольда; этим учитывается увеличение сечения ярма в k_a раз (§ 30). При прямоугольном сечении стержней постоянная C примерно на 20 ÷ 25% больше.

Определив величину S , можно провести и весь расчет трансформатора (см. формуляр, § 109).

§ 8. Некоторые частные случаи классических расчетов

Для ознакомления с методами классической теории расчета трансформаторов рассмотрим четыре задачи по расчету.¹ В первых трех предполагается, что трансформатор работает непрерывно с полной нагрузкой, чего на самом деле не бывает (случаи эти являются чисто теоретическими), в четвертой задаче учитывается частичная неполная загрузка при работе по реальному графику.

Задача 1. Даны общие потери трансформатора P_Σ ; найти то значение отношения потерь $\xi = \frac{P_c}{P_m}$, при котором при непрерывной полной нагрузке к. п. д. η трансформатора будет максимальным, и определить величину потерь P_c и P_m .

¹ Взяты из Л. 20, стр. 262—269.

Решение.

$$\eta = \frac{m \cdot U_{2\phi} \cdot I_{2\phi} \cdot \cos \varphi_2}{m \cdot U_{2\phi} \cdot I_{2\phi} \cos \varphi_2 + P_c + P_m} = \frac{m \cdot U_{2\phi} \cdot I_{2\phi} \cos \varphi_2}{m \cdot U_{2\phi} \cdot I_{2\phi} \cos \varphi_2 + P_c + m \cdot r_k \cdot I_{2\phi}^2}.$$

Приравнивая $\frac{\partial \eta}{\partial I_{2\phi}} = 0$, получают в результате:

$$P_c = m \cdot r_k \cdot I_{2\phi}^2 = P_m. \quad (9)$$

Взяв вторую производную, нетрудно убедиться, что имеет место действительно максимум, так как при этом значении P_c вторая производная будет:

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial I_{2\phi}^2} < 0.$$

Таким образом в этом случае $\xi = \frac{P_c}{P_m} = 1$ и $P_c = P_m = \frac{P_\Sigma}{2}$, что можно было предвидеть на основе теории трансформатора.

Примечание. Хотя, строго говоря, нет ни одного трансформатора, работающего непрерывно с номинальной мощностью, однако приведенным выводом можно пользоваться, причем чем ближе режим работы приближается к непрерывной нагрузке, тем ближе к единице следует выбирать значение $\xi = \frac{P_c}{P_m}$.

Задача 2. Заданы: тип трансформатора (сердечник), мощность и вес обмоток. Изменяя индукцию B и плотность тока Δ , требуется выбрать значение величины $\xi = \frac{P_c}{P_m}$ так, чтобы P_Σ было минимальным. Это значение ξ и будет наивыгоднейшим.

Решение. (K с различными индексами — коэффициенты пропорциональности и разные постоянные величины.)

$$P_c = K_1 \cdot B^\alpha \quad (\S 68); \quad P_m = K_2 \cdot \Delta^2 \quad (\S 71).$$

Но:

$$P = U \cdot I \equiv B \cdot \Delta = K_3, \quad \text{откуда} \quad \Delta = \frac{K_3}{B}.$$

Кроме того:

$$P_\Sigma = P_c + P_m.$$

Для того чтобы P_Σ было минимальным, необходимо, чтобы

$$\frac{\partial P_\Sigma}{\partial B} = 0 \quad \text{или}$$

$$\alpha \cdot K_1 \cdot B^{\alpha-1} - 2 \cdot \frac{K_2 \cdot K_3^2}{B^3} = 0,$$

т. е.

$$\frac{\alpha \cdot K_1 \cdot B^\alpha}{2} = \frac{K_2 \cdot K_3^2}{B^2} = K_2 \cdot \Delta^2.$$

Отсюда получается:

$$\frac{\alpha}{2} \cdot P_c = P_m. \quad (10)$$

Вторая производная $\frac{\partial^2 P_\Sigma}{\partial B^2}$ всегда > 0 , т. е. имеется действительно минимум.

Для $\alpha = 2$ получаем $P_c = P_m$, т. е. тот же результат, что

в задаче 1. Для $\alpha \approx 2,5$, что ближе к действительности (§ 68), $P_c \approx 0,8 P_m$, т. е. $\xi = 0,8$.

Задача 3 (метод минимума меди). Даны: мощность P трансформатора и общие потери P_Σ . Спроектировать обмотку так, чтобы вес меди G_m был минимальным. Поскольку в „гармонично“ построенном трансформаторе (§ 10) $G_{m1} \approx G_{m2}$ и $P_{m1} \approx P_{m2}$, можно считать для однофазного трансформатора:

$$a) \quad G_m = K_1 \cdot w_1 \cdot l_{w1} \cdot S_{m1},$$

$$b) \quad w_1 \cdot B = K_2 \quad (\text{из } E_1 = 4,44 \cdot w_1 \cdot f \cdot B \cdot S \cdot 10^{-8}),$$

$$c) \quad P_m = K_3 \cdot \frac{w_1 \cdot l_{w1}}{S_{m1}} \quad \left(\text{из } P_m \approx 2P_{m1} = 2r_1 \cdot I_1^2 = \frac{2w_1 \cdot l_{w1} \cdot \rho_m}{S_{m1}} \cdot I_1^2 \right),$$

$$d) \quad P_m = P_\Sigma - K_4 \cdot B^\alpha \quad (\text{из } P_c = K_4 \cdot B^\alpha).$$

При этом все постоянные коэффициенты K имеют другие значения, чем в задаче 1.

$$\text{Из (b)} \quad w_1 = \frac{K_2}{B}; \quad \text{из (c)} \quad S_{m1} = \frac{K_3 \cdot w_1 \cdot l_{w1}}{P_m}.$$

После подстановки в (a) для G_m получается выражение:

$$G_m = K_1 \cdot \frac{K_2}{B} \cdot l_{w1} \cdot \frac{K_3 \cdot l_{w1}}{P_\Sigma - K_4 \cdot B^\alpha} \cdot \frac{K_2}{B} = K_5 \frac{l_{w1}^2}{(P_\Sigma - K_4 \cdot B^\alpha) B^2}.$$

G_m будет минимальным, если знаменатель дроби будет максимальным. Если обозначить $(P_\Sigma - K_4 \cdot B^\alpha) B^2 = N$ и приравнять нулю производную $\frac{\partial N}{\partial B}$, можно получить решение задачи:

$$2B(P_\Sigma - K_4 \cdot B^\alpha) - B^2 \cdot K_4 \cdot \alpha \cdot B^{\alpha-1} = 0,$$

откуда

$$K_4 \cdot B^\alpha = \frac{2}{\alpha + 2} P_\Sigma, \quad (11)$$

т. е.

$$P_c = \frac{2}{\alpha + 2} P_\Sigma. \quad (11a)$$

Вторая производная $\frac{\partial^2 N}{\partial B^2} < 0$ для всех реально возможных значений α .

Следовательно, при $P_c = \frac{2}{\alpha + 2} \cdot P_\Sigma$ имеет место максимум N и, соответственно, минимум G_m .

При $\alpha = 2$:

$$P_c = \frac{2}{\alpha + 2} P_\Sigma = \frac{1}{2} P_\Sigma = P_m.$$

При $\alpha = 2,5$, что ближе к действительности (§ 68):

$$P_c = \frac{2}{2,5 + 2} P_\Sigma = 0,444 P_\Sigma,$$

$$P_m = 0,556 P_\Sigma, \quad \frac{P_c}{P_m} = 0,8,$$

т. е. имеем тот же результат, что в задаче 2.

Задача 4. Все три предыдущие задачи при условии $\alpha = 2$ дают один и тот же результат, а именно: при непрерывной работе трансформатора с номинальной мощностью наивыгоднейшим значением для ξ является 1.

Совершенно иное получается, если средняя нагрузка меньше номинальной мощности, как это почти всегда и бывает.

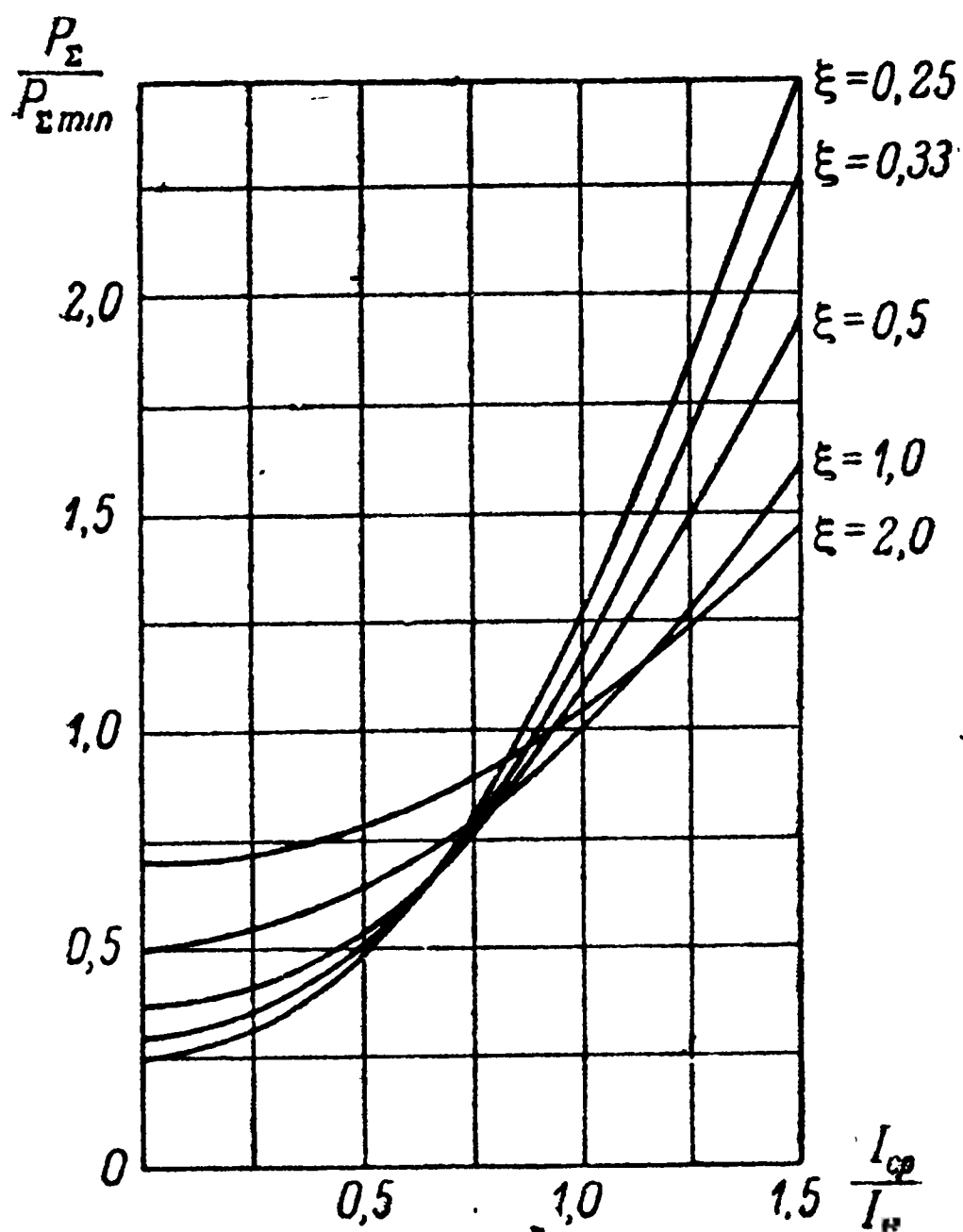


Рис. 15. Отношение полных потерь P_Σ к наименьшим возможным $P_{\Sigma \min}$ при разных значениях среднего нагрузочного тока по отношению к номинальному и при разных значениях ξ .

при меньших нагрузках они уменьшаются тем быстрее, чем меньше будет значение ξ . На основе рис. 15 построено (рис. 16) семейство кривых η — к. п. д. трансформатора для разных значений ξ (при постоянном $\cos \varphi_2 = 1$), причем для $\xi = 1$ и для полной нагрузки принято $\eta = 97,5\%$, что соответствует трансформатору 100 кВА, 6 или 10 кВ с естественным масляным охлаждением.

§ 9. Основные законы „геометрии“ трансформаторов

М. Видмаром сформулирован [Л. 4 и 47] ряд основных закономерностей, чрезвычайно полезных при предварительных расчетах и при всяких пересчетах трансформаторов. Эти законы могут быть выведены из основного положения электротехники, которое можно выразить так.

Если отдельные периоды полной нагрузки велики, то мощность трансформатора должна быть выбрана сообразно нагрузке за эти именно периоды. Тогда, например, задача 2 получает решение в виде семейства кривых (рис. 15), представляющих зависимость $\frac{P_\Sigma}{P_{\Sigma \min}}$, т. е. отношение полных потерь к наименьшим возможным для разных значений ξ и при разных относительных значениях среднего нагрузочного тока I_{cp}/I_n , где I_n — номинальный ток; при этом в основу расчетов положено значение $\alpha = 2$. Из кривых видно, что чем меньше I_{cp}/I_n , тем меньше следует брать ξ для снижения общих потерь.

Действительно, хотя при $\xi < 1$ с уменьшением ξ общие потери при полной нагрузке несколько возрастают, но

Мощность всякого электромагнитного механизма, а следовательно и трансформатора, пропорциональна произведению из магнитного потока Φ на число ампервитков $A\omega$, им пронизываемых:

$$P \equiv \Phi \cdot A\omega. \quad (12)$$

Применяя этот закон к ряду стержневых однофазных трансформаторов возрастающей мощности и предполагая: а) что все трансформаторы этого ряда геометрически подобны между собой, а поэтому имеют одинаковые коэффициенты заполнения k_m — окна трансформатора медью и k_c — сечения сердечника сталью, и б) что электромагнитные загрузки (индукция B и плотность тока Δ) одинаковы у всех трансформаторов этого ряда, можно написать:

$$A\omega = I_1 \cdot \omega_1 = \Delta \cdot S_{m1} \cdot \omega_1 = \\ = \Delta \cdot l \cdot a \cdot k_m \equiv l^2,$$

$$\Phi = B \cdot S = B \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot k_\varnothing \cdot k_c \equiv l^2.$$

Здесь a и l — размеры окна (см. рис. 1), d — диаметр сердечника, $k_\varnothing$ и k_c — см. § 27 — 29; очевидно, что для геометрически подобных трансформаторов $a \equiv l \equiv d$. На основе этого получаются следующие основные зависимости.

1. Если подставить значения $A\omega$ и Φ в формулу (12), то можно получить основное соотношение:

$$P \equiv l^4. \quad (13)$$

Вместо l может быть подставлен любой линейный размер трансформатора, например d (поскольку трансформаторы геометрически подобны между собой); таким образом:

$$P \equiv d^4. \quad (14)$$

Как видно из выражений (13) и (14), мощность трансформатора пропорциональна четвертой степени его линейных размеров. Выражение (14) является основным и может быть принято (с указанными ниже оговорками) для сравнительных и приближенных расчетов трансформаторов различной мощности, но одинакового типа и на одинаковые рабочие напряжения.

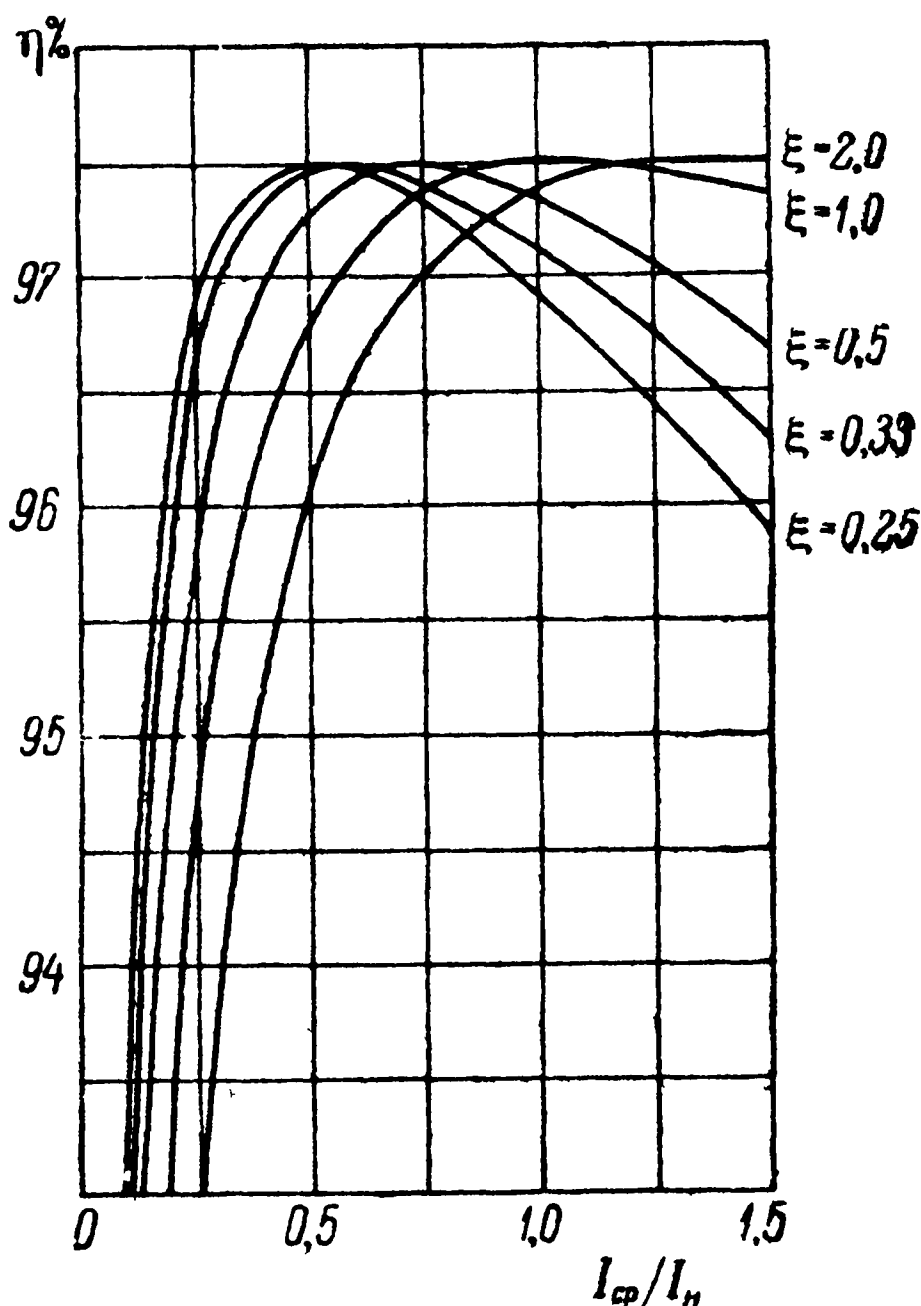


Рис. 16. К. п. д. η трансформатора при разных средних относительных нагрузочных токах и при разных ξ .

Для $\frac{I_{cp}}{I_n} = 1$ и $\xi = 1$ принято

$$\eta = 97,5\%.$$

В качестве первого приближения в применении к трансформаторам с естественным масляным охлаждением средних мощностей и напряжений, при частоте 50 Hz, можно получить для d следующее выражение.

По таблице § 7 при $s=1$ $C \approx 0,6$. Полагая в формуле (8) $f=50$, $\psi=\Delta$ (численно), $B=14\,000$ Gs, получаем:

$$S \approx \frac{60}{\sqrt{7}} \sqrt{P}.$$

Но (см. формулу § 109, п. 31):

$$d = \frac{2}{\sqrt{\pi \cdot k_{\varnothing} \cdot k_c}} \cdot \sqrt{S}, \quad (15)$$

что при $k_{\varnothing}=0,85$ и $k_c=0,85$ при помощи полученного выражения S дает:

$$d \approx 6,3 \sqrt[4]{P} \text{ см}, \quad (16)$$

где P в киловольтамперах — мощность трансформатора на 1 активный стержень.

2. Из формулы (14) получаем:

$$S \equiv d^2 \equiv \sqrt{P}. \quad (17)$$

3. Из формулы (17) при $B = \text{const}$ имеем напряжение витка:

$$e_w \equiv S \equiv \sqrt{P} \text{ (§ 37)}. \quad (18)$$

Кривые рис. 17 и 18 иллюстрируют эти соотношения. Рис. 17

дает e_w и длину окна l для серии трехфазных трансформаторов 500 ÷ 4000 kVA, 10 kV, 50 Hz, $e_k=6\%$ (завод Электросила), рис. 18 изображает зависимость $S=f(P)$ для нормализованных германских трехфазных трансформаторов, мощностью до 150 kVA того же напряжения и той же частоты.

4. Для геометрически подобных конструкций вес сердечника $G_c \equiv l^3$ и вес меди $G_m \equiv l^3$, а значит общий вес активных материалов:

$$G_c + G_m \equiv l^3;$$

подставляя сюда значение l из формулы (13), можно получить:

$$G_c + G_m \equiv P^{\frac{3}{4}} \quad \text{и} \quad P \equiv (G_c + G_m)^{\frac{4}{3}}. \quad (19)$$

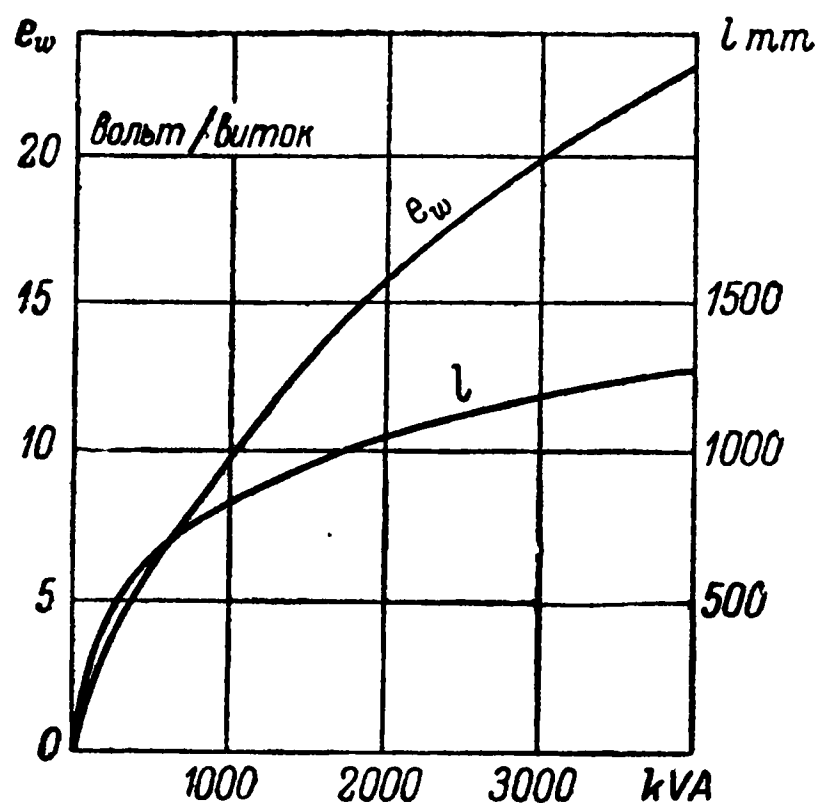


Рис. 17. Значения e_w и l для серии трансформаторов на 10 kV завода Электросила.

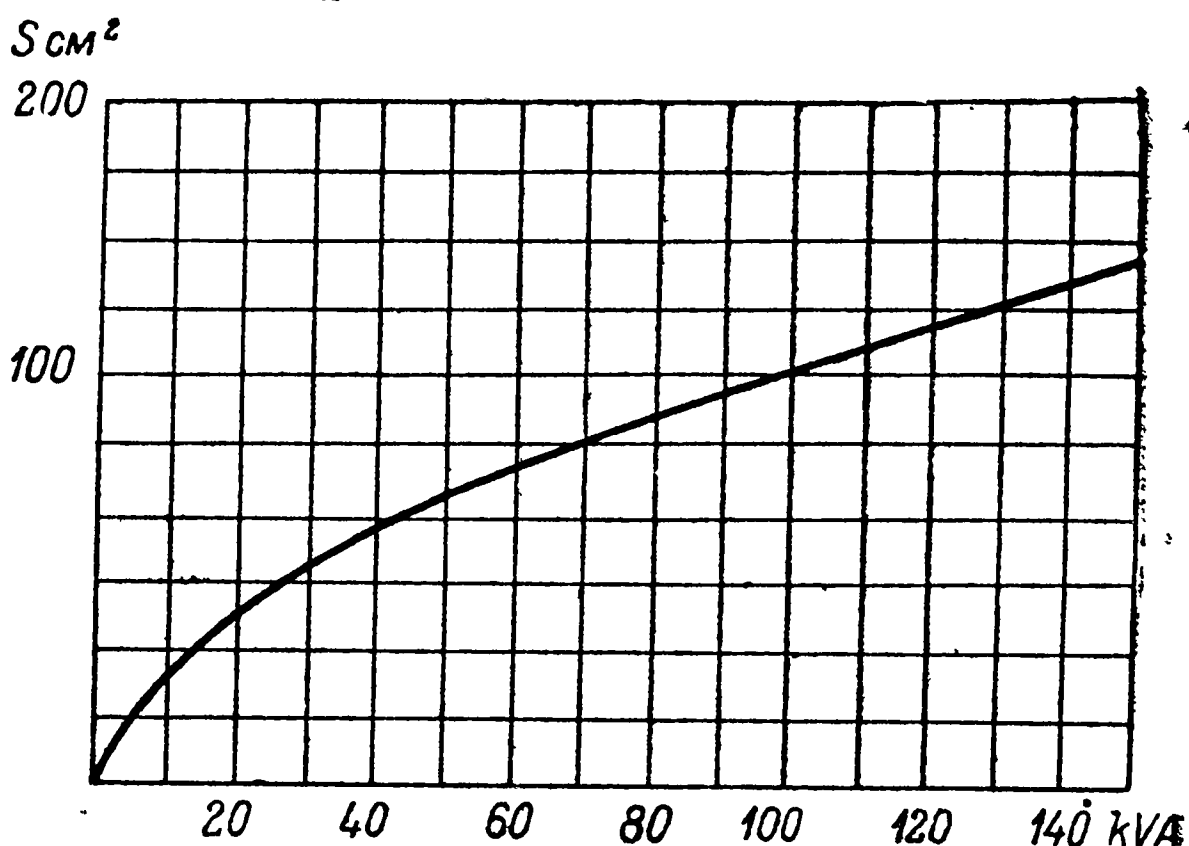


Рис. 18. Значения $S=f(P)$ для нормализованных германских трехфазных трансформаторов до 150 kVA, 10 kV.

5. Стоимость активной части при $\psi = G_c/G_m = \text{const}$:

$$C \equiv G_c + G_m \equiv P^{\frac{3}{4}}. \quad (20)$$

6. Стоимость активной части на 1 kVA мощности:

$$\frac{C}{P} \equiv P^{-\frac{1}{4}}, \quad (21)$$

т. е. стоимость 1 kVA значительно уменьшается с ростом мощности трансформатора.

7. Так как потери в сердечнике P_c и в обмотках P_m , при постоянных B и Δ , пропорциональны соответствующим весам:

$$P_c \equiv G_c \text{ (§ 68) и } P_m \equiv G_m \text{ (§ 71),}$$

то

$$\frac{P_c}{P} \equiv \frac{P^{\frac{3}{4}}}{P} \equiv P^{-\frac{1}{4}} \quad \text{и} \quad \frac{P_m}{P} \equiv \frac{P^{\frac{3}{4}}}{P} \equiv P^{-\frac{1}{4}}, \quad (22)$$

т. е. удельные потери должны уменьшаться при увеличении мощности трансформатора.

8. Так как $P_c + P_m = P_\Sigma$,¹ то к. п. д. трансформатора:

$$\eta = 100 - \frac{P_\Sigma \cdot 100}{P \cos \varphi_2 + P_\Sigma} \%$$

на основе данных п. 7 должен возрастать по мере увеличения мощности трансформатора.

9. Так как активное падение напряжения:

$$e_r = \frac{r_k \cdot I \cdot 100}{E} = \frac{r_k \cdot I^2 \cdot 100}{E \cdot I} = \frac{P_m}{P} 100\%,$$

то на основании п. 7:

$$e_r \equiv P^{-\frac{1}{4}}, \quad (23)$$

т. е. процентное значение активного падения напряжения в трансформаторе должно уменьшаться по мере увеличения мощности.

Несмотря на большую простоту и наглядность этих закономерностей, не следует забывать, что они во многих отношениях являются довольно отвлеченными, ибо относятся к абстрактному „ряду трансформаторов“, а не к действительным сериям. Вопрос этот со всей подробностью разобран автором настоящей книги [Л. 34]. Здесь же можно только указать, что причины расхождения законов, выражаемых формулами (13)—(23), с действительными соотношениями в трансформаторах лежат в ограниченной применимости основных допущений а) и б) о ряде трансформаторов возрастающей мощности. Практическая применимость приведенных законов ограничивается узкими пределами отношения мощностей около $1 \div 1,5$, т. е. когда по имеющимся данным

¹ Пренебрегая добавочными потерями (§ 69, 72, 73).

одного трансформатора мы хотим примерно наметить таковые для трансформатора в 1,5 раза большей или меньшей мощности, но того же типа, для той же частоты и того же напряжения. Уже при отношении мощностей 1:2 может встретиться необходимость в значительных отступлениях от основных вышеприведенных законов, так как при этом теряют силу основные предпосылки а) и б). Есть и другие возражения против буквального применения этих законов; например, нетрудно показать [Л. 34], что для ряда трансформаторов, удовлетворяющих соотношениям (13)—(23), будет возрастать величина e_s (а с ней и e_k) при возрастании мощности трансформаторов. Но, как известно, e_k должно оставаться постоянным (с точностью $\pm 10\%$), чтобы трансформаторы данной серии могли работать параллельно между собой.

Этим, конечно, несколько не умаляется значение упомянутых законов как основных теоретических принципов „геометрии электромашиностроения“ — так называет М. Видмар этот отдел электротехники. Только при применении этих принципов решается целый ряд вопросов о предельных мощностях трансформаторов, например, задача о трансформаторах весьма большой и весьма малой мощности; из этих же принципов выводятся основные законы проектирования трансформаторов и т. д. [Л. 46].

§ 10. Вопросы экономики при проектировании трансформаторов

В начале развития методов расчета трансформаторов основной вопрос экономики трансформаторостроения сводился к нахождению таких соотношений размеров трансформатора, при которых получается наиболее дешевый трансформатор.

О подобных расчетах М. Видмар отзывается так [Л. 46]:

„В течение целых десятилетий проблема наиболее дешевого трансформатора является весьма привлекательной целью исследований молодых инженеров. И действительно, является чрезвычайно интересным составление уравнений, связывающих основные размеры трансформатора, общеизвестные коэффициенты заполнения, веса активных материалов и издержки производства. С большим рвением приступают затем к дифференцированию подобных уравнений для нахождения чисто математическим путем относительных размеров трансформатора, причем основной целью является обычно наинизшая его стоимость.

Более 20 лет тому назад автор (М. Видмар) шел также этим путем и, как тогда казалось, получил немаловажные результаты. Однако, при практическом применении подобных расчетов, каждый раз возникали все новые трудности; наиболее дешевый трансформатор редко имел теоретически наивыгоднейшие размеры. И та теория, которая только что была выведена, являлась ложной или по крайней мере ненадежной.“

В той же работе М. Видмар ставит правильно вопрос экономики, формулируя его так: следует стремиться не к нахождению

наиболее дешевого трансформатора, но наиболее дешевой трансформации. К сожалению в многочисленных работах этого автора по данному вопросу, от первых до последних [Л. 47, 4, 8, 46, 48, 19], нет единства в ответах на этот вопрос. Согласно последней формулировке [Л. 48], наивыгоднейший трансформатор должен удовлетворять следующим трем условиям:

1) стоимости годовых потерь в сердечнике и в меди должны быть одинаковыми, что выражается равенством:

$$T_c \cdot b_c \cdot P_c = T_m \cdot b_m \cdot P_m, \quad (24)$$

где b_c и b_m — цены 1 kWh потерь в сердечнике и соответственно в меди,

а T_c и T_m — соответствующее время эквивалентных потерь (см. ниже) в часах за год;

2) общий вес стержней должен быть примерно равен общему весу обоеих ярем;

3) стоимость обмоток должна быть примерно равна стоимости сердечника с учетом издержек на изготовление того и другого.¹

Если считать $b_c = b_m$, то условие (24) дает $T_c \cdot P_c = T_m \cdot P_m$ или

$$\frac{P_c}{P_m} = \xi = \frac{T_m}{T_c}. \quad (25)$$

Если стоимость 1 kWh потерь P_m , имеющих место в часы максимума, считать дороже, чем для 1 kWh потерь P_c , то соотношение (25) соответственно изменяется. Но, во всяком случае, весьма важно правильно оценивать самые величины T_m и T_c .

Прежде всего необходимо указать на разницу в характере загрузки трансформатора собственными потерями P_m по сравнению с нагрузкой основной.

Так как $P_m = m \cdot r_k \cdot I_\phi^2$, в то время как $P = m \cdot U_\phi \cdot I_\phi$, то ординаты диаграммы нагрузки трансформатора от потерь P_m будут представлять (в другом масштабе) квадраты ординат основной его нагрузки. Поэтому сама обмотка трансформатора в отношении ее потерь представляет, если можно так выразиться, гораздо менее интенсивно загруженного потребителя, чем та сеть, которую этот трансформатор питает. Пусть, например [Л. 48], диаграмма а рис. 19 изображает суточный график нагрузки трансформатора; это типично „осветительный“ график.

При непрерывной полной нагрузке с номинальной мощностью P_n трансформатор мог бы отдать ту же энергию за 10,5 час. (диаграмма б). Обращаясь к нагрузке трансформатора потерями в обмотках (диаграмма с, ординаты которой предста-

¹ Нормальные цены (с обработкой) можно считать для стали марки ЕС4А 1 руб., марки ЕС1А 0,7 руб., для провода медного крупных сечений 2 р. 60 к. — 3 р. 20 к., мелких сечений 3 р. 50 к. — 4 р. 50 к. за килограмм.

влияют в некотором масштабе квадраты ординат диаграммы *a*), нетрудно подсчитать, что эквивалентное время полных потерь в обмотках (диаграмма *d*) составит только 7,125 час., т. е. гораздо меньше, чем 10,5 час.

В общем случае, если годовой график представить [Л. 39, стр. 27] в виде кривой $I=f(t)$, то:

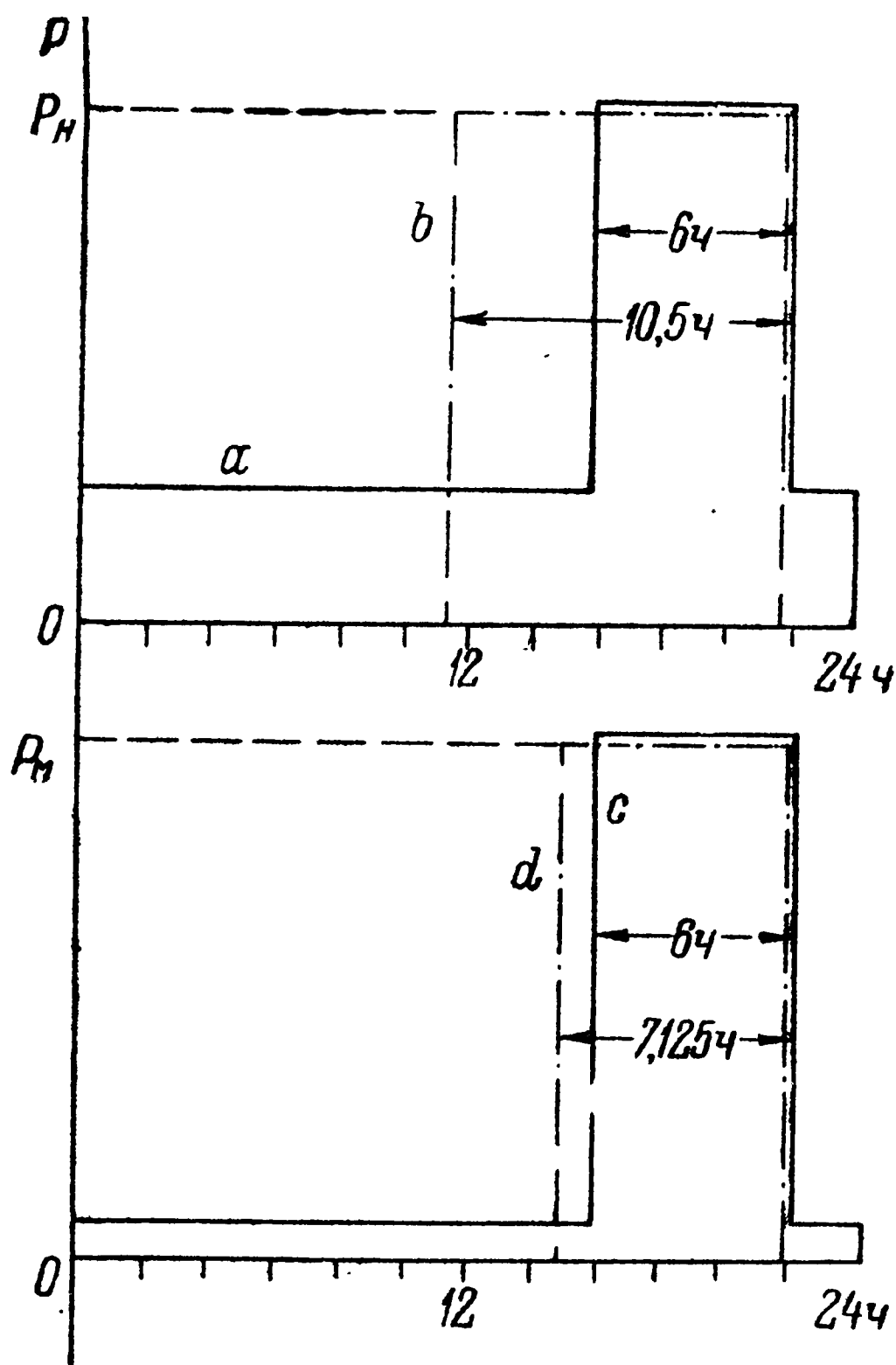


Рис. 19. График нагрузки $P=f_1(t)$ трансформатора и график потерь $P_m=f_2(t)$.

После подстановки в формулу (26) получается:

$$\frac{T_m}{T_n} = \frac{1,1 \cdot T_n}{\sum t} \approx 1,1 \frac{T_n}{8760},$$

и окончательно:

$$T_m \approx \frac{T_n^2}{8000}. \quad (27)$$

По этой приближенной формуле, зная T_n , можно находить величину T_m , определяющую в основном всю экономику трансформатора.

$$T_n = \frac{\sum I \cdot t}{I_n} = \frac{I_{cp} \cdot \sum t}{I_n};$$

$$T_m = \frac{\sum I^2}{I_n^2} = \frac{I_{cp.кв}^2 \cdot \sum t}{I_n^2},$$

где T_n — число часов, соответствующих энергии, отданной трансформатором за год, I_{cp} — средняя, а $I_{cp.кв}$ — средняя квадратичная нагрузки.

При делении второго равенства на первое получается:

$$\frac{T_m}{T_n} = \frac{I_{cp.кв}^2}{I_{cp} \cdot I_n}. \quad (26)$$

Согласно исследованию действительных графиков нагрузки можно считать [Л. 39]:

$$\frac{I_{cp.кв}}{I_n} \approx 1,05.$$

Далее из первого равенства:

$$\frac{I_{cp}}{I_n} = \frac{T_n}{\sum t}.$$

При отсутствии данных для определения T_m и при предварительных расчетах можно принимать:

Для нормальных трансформаторов с естественным масляным охлаждением	$\xi = 0,25 \div 0,35$
Для сравнительно высоковольтных трансформаторов . . .	$\xi = 0,5 \div 0,8$
Для трансформаторов с естественным воздушным охлаждением	$\xi = 0,45 \div 0,6$

(см. также § 8, задача 1, примечание).

Наиболее полно разобраны вопросы экономики в работах проф. Г. Н. Петрова [Л. 36—39], к которым и рекомендуется обратиться читателю, интересующемуся этим основным вопросом трансформаторостроения. Здесь приводятся некоторые из основных выводов этих работ, учитывающие все важнейшие факторы не только технические, но и экономико-статистические.

1. Стоимость потерь в трансформаторе за время его амортизации во много раз превышает стоимость самого трансформатора и потому играет доминирующую роль.

2. Переход к большим плотностям тока (практика Европы) экономически чрезвычайно нецелесообразен, в особенности учитывая значительно большие использования трансформаторов в СССР по сравнению с использованием их в Европе. В будущем трансформаторостроение должно безусловно ориентироваться на низкие плотности тока, что соответствует практике США; трансформаторы, в особенности мощные и хорошо используемые, надо строить „богатыми медью“ — по аналогии с термином М. Видмара „бедные медью трансформаторы“ [Л. 19].

3. Поскольку условия настоящего момента повелительно диктуют необходимость соблюдения возможной экономии в расходовании цветных металлов, приходится разрабатывать конструкции с возможно полным использованием меди, учитывая, однако, те перерасходы на энергии потерь, на которые временно приходится идти.

Исследование проблемы экономического, и в то же время „гармонично“ построенного, стержневого трансформатора дает следующие основные зависимости для расчета его.

1. Отношение средней длины витка l_w обмоток к средней высоте их вдоль оси должно быть равно:

$$1,5 \div 1,7.^1 \quad (28)$$

Как раз это же соотношение приводит к практически приемлемым величинам индуктивности трансформатора.

2. Должно быть соблюдено соотношение $P_m/P_c \approx 0,2 \cdot \Delta^2$, что для средних и мощных трансформаторов дает:

$$\frac{P_c}{P_m} \approx \frac{1}{3}. \quad (29)$$

¹ См. сноску ¹ на стр. 28.

Для сильно загруженных трансформаторов гидростанций и т. п. это отношение должно быть ближе к 1 (§ 8, задача 1).

3. Потери $P_{\text{м}}$ будут наименьшими, если их распределить поровну между обеими обмотками, т. е. выбрать:

$$P_{\text{м1}} \approx P_{\text{м2}}. \quad (30)$$

От этого соотношения приходится отступать по условиям охлаждения обмоток.

§ 11. Общие технические требования, предъявляемые к трансформаторам

При расчете и проектировании трансформаторов необходимо все время иметь в виду те основные технические требования, которым должен удовлетворять всякий трансформатор. В порядке их важности они могут быть перечислены в следующей последовательности.

1. Трансформатор должен выдерживать не только номинальное напряжение и повышенное испытательное (§ 56), которому он подвергается при испытании изоляции, но и те перенапряжения, которые могут воздействовать на трансформатор при всяких переходных режимах его работы (§ 55); отсюда требование *электрической прочности* трансформатора.

2. Ни одна часть трансформатора не должна перегреваться сверх установленных норм при работе с номинальной мощностью при заданном ПКР % (§ 5, п. 8); иногда техническими условиями предусматриваются иные, дополнительные требования в отношении нагревания или перегрузки.

Кроме того, трансформатор должен выдерживать короткие замыкания в течение определенного промежутка времени, не перегреваясь сверх определенной нормы. Вытекающее отсюда требование может быть названо требованием *термической прочности* трансформатора.

3. Как известно, на обмотки трансформатора действуют при коротком замыкании весьма большие силы, воспринимаемые затем и другими конструктивными частями трансформатора (§ 105—107). Ни обмотки, ни прочие детали не должны деформироваться даже при повторном действии этих сил. Отсюда требование *механической прочности* всего трансформатора.

4. Обычно трансформатор должен *работать параллельно* с другими заданными трансформаторами; как известно, это влечет за собой определенные требования относительно величины активной и реактивной слагающих напряжения короткого замыкания e_k (§ 16). Обычно величина e_k бывает задана (§ 5).

5. На пятом месте можно поставить условие *общей экономичности* трансформатора, т. е. требование наинизшей стоимости издержек по эксплуатации трансформатора (включая его стоимость, стоимость потерь в нем,¹ ухода и обслуживания и т. д., см. § 10).

¹ Куда должны войти и потери в охлаждающей системе (работа насосов, вентиляторов и т. д.).

По сравнению с первыми четырьмя требованиями экономический фактор, важный сам по себе, все же отходит на последнее место, ибо при несоблюдении первых требований трансформатор вообще не будет в состоянии работать, или будет часто выбывать из строя, принося тем самым потребителю огромные убытки, которые сразу поглотят ту экономию, которая была сделана, например, на изоляционных расстояниях или изоляционных материалах при изготовлении трансформатора, или была получена путем того или иного распределения потерь в нем.

§ 12. Практические расчеты; метод расчета автора

Ход расчета трансформатора будет различен в зависимости от того, какие данные содержит практическое задание (§ 14), какие из основных величин можно считать известными, и какие должны быть выбраны; расчеты ведутся различно при проектировании учебном и заводском.

Что касается учебного проектирования, то при этом, конечно, производственные соображения имеют второстепенное значение, и проектирующий мало связан в расчетах и в конструировании. Если какие-либо размеры и величины вполне оправданы теорией и не представляют между собой противоречий, если при этом соблюдены существующие ОСТы и нормы, то данный расчет является приемлемым. При учебном проектировании приходится пользоваться по преимуществу рациональными, научно обоснованными формулами; эмпирические величины и коэффициенты следует оговаривать с указанием первоисточников.

Заводское проектирование ведется применительно к определенному производству и его возможностям, иначе самые лучшие расчеты и конструктивные разработки могут явиться бесполезными, ибо не смогут быть выполнены на основном имеющемся оборудовании (ножницы для резки листов трансформаторной стали, обмоточные станки, вакуум-печи, краны, оборудование испытательного отдела и т. п.). При заводских расчетах приходится учитывать нормальные имеющиеся детали (например, изолирующие цилиндры), качество наличных материалов и т. д. Вот почему, между прочим, рабочие чертежи трансформаторов стремятся разрабатывать на том заводе, на котором трансформаторы будут изготавливаться. Другой особенностью заводского проектирования является использование накапливаемого опыта, т. е. чисто эмпирические данные, под которые еще не подведена теория, но которые оправдываются на практике.

При заводском проектировании могут встретиться следующие разновидности расчета трансформаторов.

а. Рассчитываемый трансформатор принадлежит к числу нормальных типовых. Заданы условия 1—9 (§ 14); условия 10 и 11 или тоже заданы, или могут быть сразу же выбраны. Для нормальных типов трансформаторов на заводе обычно имеются заранее составленные таблицы основных размеров сердечника,

обмоток, величины потерь и прочих основных данных. Благодаря этому расчет чрезвычайно упрощается и сводится к простым арифметическим действиям — подбору для обмоток числа витков, сечения и изоляции проводов и к размещению обмоток в окне трансформатора. В результате расчета почти „автоматически“ получается трансформатор, удовлетворяющий данным каталога и техническим нормам. Этот случай, простой и самый частый на заводе, общего интереса, однако; не представляет, хотя и имеет свои частности и особенности, интересные для немногочисленных заводских работников.

б. Гораздо реже, при проектировании по специальным заданиям, встречаются случаи, когда разрабатывается совсем новый тип трансформатора, не укладывающийся в обычные заводские нормы, причем обязательным является соблюдение, кроме требований задания, только общетехнических правил и норм с учетом, конечно, производственных возможностей завода; в остальном же проектирующий свободно выбирает наилучший вариант расчета.

с. Еще реже приходится проектировать сразу целую серию трансформаторов (§ 19).

Ход практического расчета зависит в очень большой степени от типа трансформатора, в особенности на стадии предварительных расчетов. Не только расчетные коэффициенты в формулах, но и самые формулы будут различны; последовательность расчета и „маневрирование“ при выборе вариантов будут иными. Так, например, применение чередующихся обмоток дает возможность выбором числа групп в обмотках подбирать желаемую индуктивность.

Еще большим своеобразием отличается расчет специальных трансформаторов; для примера можно указать хотя бы на сварочные, имеющие обычно, независимо от мощности, всего один виток во вторичной обмотке, и др.

Метод расчета автора. Излагаемый метод расчета трансформаторов (см. формуляр § 109 и примеры § 110—113) основан на работах автора [Л. 14, 33, 34, 35].

Особенностями этого метода являются:

1) учет основных технических требований, которым должен удовлетворять трансформатор (§ 11);

2) строгая систематичность расчета;

3) ведение расчета „концентрическим методом“ в три стадии (§ 13);

4) введение в основное задание величины e_k — напряжения короткого замыкания трансформатора, на важность чего указано в § 5 и 9;

5) учет требований экономики введением в основное задание величины η — к. п. д. трансформатора — и принятием за основу расчета величины $\xi = P_c/P_m$ (§ 10);

6) составление эскизов рассчитываемых деталей трансформатора параллельно с расчетом; эти эскизы служат базой для дальнейших расчетов.

В противоположность большинству существующих методов расчета данный метод отнюдь не основывается на коэффициенте k_m заполнения окна трансформатора медью, так как этот коэффициент сильно колеблется в зависимости от типа, мощности и напряжения трансформатора, а потому в основу расчета положен быть не может.

В остальном для расчета используются некоторые данные классической теории расчета, законы подобия (§ 9), а также новые работы по экономике трансформаторов (§ 10).

ГЛАВА IV

ОБЩИЙ ХОД РАСЧЕТА И ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ СТАДИЯ РАСЧЕТА

§ 13. Общий ход расчета

Ознакомившись с общими принципами расчета трансформаторов, можно приступить к самому расчету, который рекомендуется вести в такой последовательности:

1) внимательное ознакомление со всеми пунктами практического задания (§ 14), расчет основных электрических величин (§ 15) и оценка задания (§ 16);

2) предварительный расчет трансформатора с использованием формуляра (до п. 41), указаний § 17—23, примеров 1—4 и табл. I и II приложений;

3) окончательный (детальный) расчет трансформатора и всех его данных с построением характеристик, составлением эскизов и т. д. по указаниям гл. VI—XII этой книги (см. формуляр § 109, п. 43—130).

На первой стадии начинающему расчетчику дается возможность обдумать задание, хорошо в нем разобраться и наметить тип конструкции, прежде чем взяться за формулы и расчеты. У опытного расчетчика этот начальный процесс расчета „сам собою“ продлевается в уме.

Что касается предварительного расчета, то общая задача его может быть сведена к следующему:

а) не производя полного расчета трансформатора, наметить вероятные основные размеры его сердечника на базе общих принципов с учетом выбираемых расчетных величин,¹

б) разместить на этом сердечнике требующиеся обмотки.

При этом, конечно, должны быть учтены не только все данные практического задания (§ 14), но и основные технические требования (§ 11).

¹ Здесь не мешает повторить сказанное выше (§ 1) о том, что отнюдь не следует детально проектировать или вычерчивать сердечник трансформатора, пока не выяснена во всех деталях его обмотка.

Весьма вероятно, что с первого раза задачу эту решить не удастся, и придется делать изменения, иногда даже в основных выбираемых расчетных величинах; однако сделать это будет сравнительно нетрудно, пока рассчитывающий не углубился в детали окончательного расчета.

Очень практично на предварительной стадии вести расчет сразу по 2-3 вариантам, выбирая, например, различные значения плотности тока Δ , отношения потерь ξ и т. д. с тем, чтобы затем избрать наилучший вариант. Возможные методы варьирования при предварительном расчете указаны в § 17 и 18. По лучшему варианту и следует вести окончательный, детальный расчет.

В формуляре, в части, относящейся к предварительному расчету, приведены как сами расчетные формулы, так и краткие объяснения и данные; для более подробных справок служат ссылки на параграфы этой книги.

Произведя предварительный расчет и выбрав, если нужно, вариант, можно приступить к детальному расчету, который уже не потребует вариантов, если при предварительном расчете не было сделано ошибок и упущений. В формуляре, в частях, относящихся к детальному расчету (п. 43—130), против формул даны лишь ссылки на соответствующие параграфы книги.

§ 14. Практическое задание

Практическое задание, по которому ведется самый расчет трансформатора, должно содержать прежде всего п. 1—11 „основного“ задания (§ 5). Для большей ясности здесь вновь кратко перечислены эти 11 пунктов, причем в скобки заключены условия, часто подразумевающиеся.

- | | |
|--|---|
| 1. m — число фаз. | 7. (Соответствие Правилам и Нормам). |
| 2. P — номинальная мощность в киловольтамперах. | 8. (Режим работы). |
| 3. $U_1/U_2 \approx E_1/E_2$ — номинальные напряжения в вольтах. | 9. (Тип трансформатора). |
| 4. f — частота. | 10. e_k — напряжение короткого замыкания. |
| 5. Схема и группа соединений. | 11. η — к. п. д. |
| 6. Система охлаждения. | |

К этим основным пунктам надо сделать некоторые, чисто практические, дополнения, которые и характеризуют „практическое задание“.

К п. 3. Очень часто для одной из обмоток указываются три или пять различных напряжений, т. е. требуется обеспечить возможность регулировки напряжения путем переключения числа витков; для трехобмоточных трансформаторов регулировка может потребоваться и на двух обмотках. Кроме задания процента регулировки — обычно $\pm 5\%$ или $\pm 2 \times 2\frac{1}{2}\%$, необходимо указание, на которой из обмоток — для двухобмоточного трансформатора обычно на обмотке высшего напряжения — предусматри-

вается регулирование, т. е. переключение числа витков, и каким именно образом предполагается производить это переключение, например, путем: а) вывода добавочных изоляторов на крышку бака, б) применения многоклеммных изоляторов, с) переключения на клеммовой доске или д) применения специального переключателя (общего для всех трех фаз или отдельного для каждой фазы); подробно см. § 43.

Все это относится к регулировке напряжения без нагрузки; если же требуется регулировка под нагрузкой, то дело осложняется. В этом случае нужно решить основной вопрос о выборе системы регулировки — в главных трансформаторах, или же во вспомогательных, включаемых последовательно с главными; нужно также выбрать систему аппаратуры и т. д. Все эти вопросы лежат за пределами объема данной книги.

К п. 5. Все особенности схемы соединения (вывод нулевой точки, требуемая иногда возможность пересоединения обмотки на параллельные и последовательные группы и т. п.) должны быть детально оговорены в задании, так как устройства для переключений, а также подводимые к этим устройствам провода, требуют лишнего места.

К п. 10 и 11. В зависимости от того, как именно сформулировано задание в отношении п. 10 и 11, строится и весь ход расчета трансформатора; в данном случае величины e_k и η будут считаться непосредственно заданными в процентах.

Для мощных высоковольтных трансформаторов существует еще следующий (12-й) пункт задания.

12. Степень изоляции нулевой точки, т. е. указание на то, будет ли последняя заземлена глухо, или же изоляция ее должна быть рассчитана на определенное напряжение. От этого зависят и вес, и цена трансформатора, так как полная изоляция нулевой точки требует добавочного места и добавочных изоляционных материалов.

13. В некоторых случаях, главным образом при проектировании нестандартных трансформаторов, задание может осложняться некоторыми дополнительными требованиями, например:

а) специальные условия нагревания, как то: ненормальная температура охлаждающей среды, превышение температуры меньшее, чем по нормам и т. п.;

б) специальные требования, предъявляемые к изоляции трансформатора (ненормальные испытательные напряжения и т. д.);

с) специальные конструктивные требования, касающиеся габаритов и веса всего трансформатора или его частей.

14. Для всех вообще трансформаторов должно быть указано, предназначаются ли они для внутренней или для наружной установки, какие требуются катки (для мощных трансформаторов) — с ребрами или без реборд, какая желательна колея и какое направление движения — широкой или узкой стороной.

О своеобразии задания по расчету трехобмоточных трансформаторов сказано в § 21.

§ 15. Расчет основных электрических величин

Прежде чем рассчитывать самый трансформатор, необходимо подсчитать его основные электрические величины, т. е. номинальные фазные напряжения, а также линейные и фазные токи (§ 109, п. 1—4).

При этом необходимо уделить особенное внимание п. 5 задания (группа и схема соединений обмоток); схему необходимо вычертить. У начинающих обычно следующие ошибки: для трехфазных трансформаторов — неверные подсчеты фазных токов или напряжений для обмоток, соединяемых в Y или Δ ; для однофазных трансформаторов с двумя активными стержнями (обычный тип) — ошибка в определении токов и напряжений, приходящихся на обмотку одного стержня при последовательном или параллельном соединении обмоток обоих стержней. Происходит это, вероятно, вследствие того, что в теоретических курсах рассматриваются, главным образом, однофазные трансформаторы с простейшими обмотками, изображаемыми совершенно условно.

Расчет основных электрических величин обычно ведется по номинальным значениям напряжений и токов, т. е. без учета к. п. д. и изменения напряжения Δu % в трансформаторе при нагрузке. В случае задания нескольких напряжений (регулировка напряжения) расчет ведется по среднему значению напряжения и среднему току, если крайние значения отличаются от средних не более чем на $\pm 5\%$. Такую именно регулировку ($\pm 5\%$) имеют нормальные трансформаторы согласно ОСТ 2524. При больших же пределах регулировки все важнейшие расчетные величины (B , Δ , P_c , P_m , η и т. д.) определяются особо для каждой ступени регулировки. В данной книге все расчеты ведутся по среднему значению напряжения (см. примеры § 110—113).

При соединении одной из обмоток трехфазного трансформатора — обычно обмотки низшего напряжения — в Z (зигзаг, см. рис. 87, Λ), фазное напряжение связано с линейным тем же соотношением, что и для соединения Y (звезда), но фазные э. д. с. создаются половинами обмоток каждой двух фаз, э. д. с. которых сдвинуты между собою на 120° . Поэтому расчетным напряжением для каждой из этих половин обмоток является:

$$\frac{U}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3}} = \frac{U}{3}$$

т. е. третья часть линейного напряжения.

О расположении на стержне обмоток, включаемых в зигзаг, см. § 53 (конец).

В числе основных электрических величин указываются испытательные напряжения всех обмоток.

§ 16. Разбор и оценка задания; выбор типа конструкции

1. Тип трансформатора. Обычно тип трансформатора бывает predetermined заданием (§ 14, п. 9). Если бы, однако, рассчиты-

вающему самому пришлось выбирать тип конструкции, то при этом можно руководствоваться следующими указаниями.

Наиболее распространенные нормальные силовые трансформаторы с масляным охлаждением имеют по крайней мере одну обмотку на сравнительно высокое напряжение, измеряющееся в киловольтах. Поэтому для них наиболее подходящим типом является стержневой трансформатор с концентрическими обмотками (рис. 1 — однофазный и рис. 2 — трехфазный). Наружной обмоткой почти всегда является более высоковольтная обмотка; обе обмотки на рис. 1 и 2 изображены условно, без подразделения на катушки.

Преимущества этого типа трансформаторов для указанного назначения следующие:

1) лучшее и более надежное устройство и расположение обмотки высшего напряжения и ее изоляции;

2) лучшее охлаждение, что для нее очень важно, так как она содержит много изоляции, затрудняющей охлаждение;

3) простота изготовления обмоток; обмотка одного стержня может быть намотана без паяек — „непрерывная обмотка“ (§ 48);

4) простота устройства всех отводов к изоляторам и переключателям, а также соединений между обмотками разных стержней;

5) удобство расположения переключателей (без нагрузки) как для однофазного, так и для трехфазного трансформатора;

6) доступность для осмотра обмотки высшего напряжения и всех деталей, находящихся под высоким напряжением.

Трансформаторы с естественным воздушным охлаждением строятся на небольшие мощности и невысокие напряжения, примерно до $3 \div 6$ kV. Конструкция выбирается при мощностях до $40 \div 50$ kVA для однофазных трансформаторов по рис. 1 и до $60 \div 100$ kVA — для трехфазных — по рис. 2. При больших мощностях применяют чередующиеся обмотки (рис. 9), причем дисковые катушки располагают вертикально для лучшего охлаждения их воздухом (см. еще § 46 и 47). Этот тип применяют для низковольтных (печных, сварочных) трансформаторов, для больших токов и при многих параллельных ветвях в обмотке. При масляном охлаждении вертикальное расположение дисковых катушек необязательно. Для трансформаторов высоковольтных (свыше $10 \div 20$ kV) этот тип мало подходит из-за трудности устройства изоляции нескольких групп обмотки высшего напряжения.

Конструкция по рис. 10а применяется для очень небольших однофазных трансформаторов (простота устройства обмотки); то же относится к конструкции по рис. 10б, особенностью которой является возможность устройства значительного количества ответвлений от обмоток, для чего можно использовать почти всю окружность катушек.

Трансформаторы броневого типа, однофазные (по рис. 5) с круглыми обмотками, довольно распространенные в США, применяются иногда и в Европе для мощностей до 10 000 kVA и напряжений до 110 kV. Преимущества этого типа те же, что указаны выше для типа рис. 1. Кроме того, можно отметить

простоту обмоток, размещающихся лишь на одном стержне, и меньшие габариты трансформатора, так как бак получается при этом круглый и может почти вплотную подходить к боковым ярмам, в то время как между баком трансформатора по рис. 1 и обмотками должно быть достаточное изоляционное расстояние; о преимуществах круглого бака см. § 107.

О трансформаторах броневых типа с чередующимися обмотками по рис. 3 можно повторить то же, что сказано выше о типе по рис. 9. Вообще говоря, при условии тщательного изготовления и наличия хороших изолирующих материалов, трансформатор броневых типа имеет следующие преимущества:

1) сечение сердечника у него в $1,7 \div 2$ раза больше, чем у трансформатора стержневого типа (§ 31), во столько же раз будут меньше и числа витков обмоток; число катушек будет тоже значительно меньшим;

2) вертикальные катушки чередующихся обмоток броневых трансформаторов хорошо охлаждаются;

3) подбором надлежащего числа групп обмоток (§ 18) легко получить желаемую индуктивность трансформатора;

4) активная часть однофазного трансформатора по рис. 3 в плане представляет фигуру, близкую к квадрату (см. табл. 11 величин ζ), и хорошо вписывается в круглый бак;

5) применение чередующихся обмоток позволяет легко решать вопрос устройства обмоток на весьма большие токи при помощи параллельного включения групп обмотки низшего напряжения (см. также § 50).

Однако у броневых трансформаторов гораздо больше недостатков, чем преимуществ, в особенности при применении на высокие (до 110 kV) и весьма высокие (150 kV и более) напряжения. Недостатки эти следующие:

1) много бóльшая (на $50 \div 70\%$) затрата изолирующих материалов, представляющих значительную часть стоимости высоковольтных трансформаторов;

2) невозможность устройства непрерывной (§ 48) обмотки;

3) почти полное закрытие обмоток и невозможность их осмотра для контроля и определения места повреждения без полной разборки трансформатора;

4) громадные усилия, действующие на обмотки при коротких замыканиях (§ 105—106);

5) трудность работы по выполнению соединений и паяк над открытыми сверху каналами между катушками; в каналы может попасть олово, упасть гайка и т. п., в результате чего может потребоваться разборка всего трансформатора.

Трехфазные трансформаторы броневых типа по рис. 4 выполняются исключительно с чередующимися обмотками, которые для всех трех фаз расположены в параллельных плоскостях одна за другой; осевой размер трансформатора от этого очень сильно возрастает, в особенности при высоких напряжениях. В остальном про этот тип можно повторить сказанное про соответствующие однофазные трансформаторы.

Однофазные броневые трансформаторы как силовые в СССР и в Европе почти не применяются, но применяются как печные, нагревательные, сварочные и т. п., вообще там, где требуется получить большие токи при низких напряжениях; в США их много строит фирма Вестингауз и др. Трехфазные броневые трансформаторы теперь применяются редко.

2. Трехфазные и однофазные трансформаторы. При сравнении трехфазных и однофазных трансформаторов с точки зрения их веса, стоимости и т. д. надо различать следующие случаи.

Первый случай. Сравняется один трехфазный трансформатор с группой из трех однофазных на ту же общую мощность с теми же номинальными напряжениями и той же индуктивностью; при этом нужно еще уточнить, имеют ли сравниваемые трансформатор и трехфазная группа одинаковые электромагнитные загрузки (B и Δ) или же одинаковые к. п. д.

Второй случай. Сравняется трехфазный трансформатор с одним однофазным той же мощности и с одинаковыми номинальными напряжениями и индуктивностью.

В первом случае трехфазные трансформаторы имеют следующие преимущества:

- 1) общий вес активных и неактивных материалов для трехфазного трансформатора составляет 60—80% веса этих материалов для группы из трех однофазных;
- 2) так как количество трансформаторов втрое меньше, то проще их транспорт, монтаж, сушка и т. д.;
- 3) гораздо меньше занимаемое место;
- 4) проще схема и конструкция всей установки;
- 5) трехфазная резервная единица представляет для трехфазной системы гораздо более ценный резерв, чем один однофазный запасной трансформатор для трехфазной группы.

В противовес этому группа из трех однофазных трансформаторов имеет следующие преимущества:

- 1) возможность создания группы большей мощности, чем предельная мощность одного трехфазного трансформатора;

2) облегчение транспорта, монтажа и т. д. вследствие гораздо меньшего веса и меньших габаритов отдельных трансформаторов, составляющих группу;

3) возможность обойтись системой естественного масляного охлаждения для однофазных трансформаторов группы, в то время как для одного трехфазного потребуется уже искусственная система охлаждения;

4) большая механическая прочность трансформаторов при коротких замыканиях, так как усилия, действующие при этом на обмотки, пропорциональны мощности, приходящейся на один активный стержень; при обычной же конструкции однофазных трансформаторов в группе будет шесть активных стержней, в то время, как у трехфазного трансформатора их только три.

Что касается стоимости, то на рис. 20 приведено, по данным AEG и SSW, соотношение между стоимостью установленных однофазных и трехфазных трансформаторов при одинаковой

общей рабочей мощности, считая и резерв. Ординаты кривых обозначают процентное увеличение (+) или уменьшение (—) стоимости однофазных трансформаторов, при различных рабочих напряжениях, по сравнению со стоимостью трехфазных.

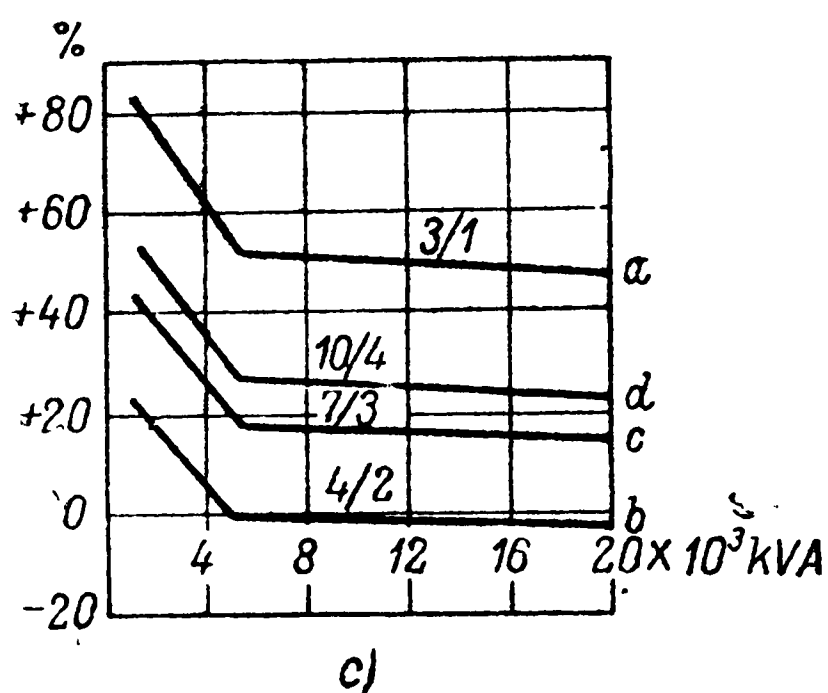
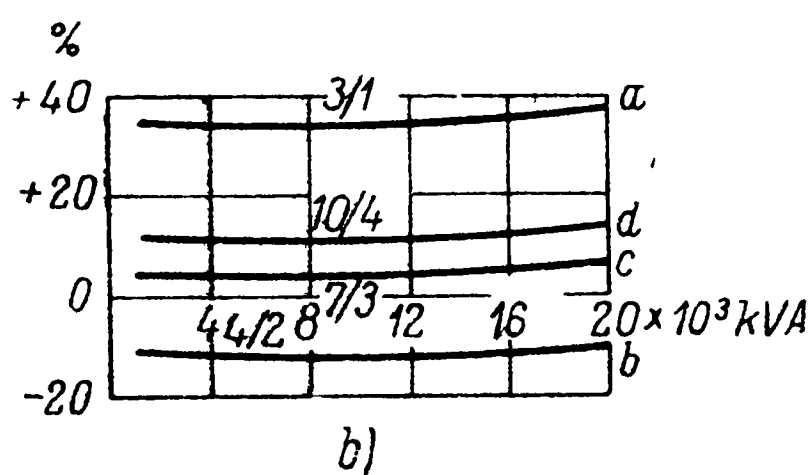
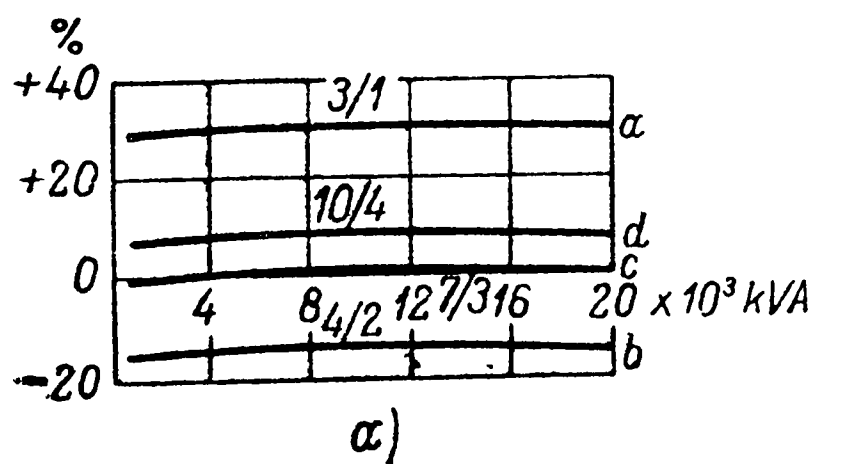


Рис. 20. Сравнительная стоимость трансформаторов; числитель дроби — число однофазных трансформаторов, знаменатель — число трехфазных (то и другое — включая резервную единицу). *a* — трансформаторы с естественным масляным охлаждением и с внешними водяными охладителями масла 35/6 kV, Y/Δ; *b* — то же, но 66/6 kV, Y/Δ; *c* — трансформаторы с внешними водяными охладителями масла 154/6 kV, Y/Δ.

ловине ярем, мы получим однофазный трансформатор с мощностью, составляющей $\frac{2}{3}$ от прежней. Но теперь и вес на 1 kVA и потери на 1 kVA будут меньше, чем у трехфазного трансформатора мощностью $\frac{2}{3}$ прежней, так как они будут соответ-

Как видно из рисунка, при 35 kV снижение цены для одной группы однофазных трансформаторов имеет место лишь в размере 15%, хотя установленная мощность снижается в 1,5 раза ($\frac{4}{3}P$ вместо $2P$ при трехфазных, где P — рабочая мощность группы). При 154 kV пропадает и это преимущество; при большем числе трансформаторных групп оно пропадает и для напряжения 35 kV.

Учитывая изложенное выше, в СССР и в Европе в качестве нормальных силовых трансформаторов применяют везде, где это возможно, трехфазные, которые согласно ОСТ 2524 строятся до мощности 31 500 kVA. Однофазные трансформаторы применяются там, где это дает решительные преимущества.

Конечно, однофазные трансформаторы имеют еще свою обширную область применения как печные, сварочные, нагревательные и прочие специальные (см. выше).

Второй случай — сравнение трехфазного трансформатора с одним однофазным, равным по мощности и с одинаковыми прочими характеристиками — также представляет некоторый интерес.

Очевидно, что, откинув у обычного трехфазного стержневого трансформатора один из крайних стержней и почти по по-

ствовать трансформатору прежней мощности. Это еще не все; сердечник нового однофазного трансформатора будет иметь вес меньший, чем $\frac{2}{3}$ прежнего, а значит при той же индукции потери будут меньше, чем $\frac{2}{3}$ прежних, да вдобавок отпадут добавочные потери от эллиптического поля, имеющие место в ядре трехфазных стержневых трансформаторов (§ 69). Далее, получившийся однофазный трансформатор будет применим на напряжение в $2:\sqrt{3}=1,15$ раз большее по теории соразмерности трансформаторов [Л. 46, стр. 18];¹ поэтому при прежнем напряжении коэффициент заполнения окна обмоткой будет выгоднее. Высота бака может быть сокращена, так как периметр его составит более $\frac{2}{3}$ прежнего; уменьшатся вес бака и вес масла. Итак, у однофазного трансформатора можно получить те же (или еще меньшие) значения веса на 1 kVA и потерь на 1 kVA, что у трехфазного трансформатора на 50% большей мощности. Но так как эти последние величины изменяются, при равных условиях, пропорционально корню 4-й степени из отношения мощностей (§ 9), в данном же случае $\sqrt[4]{1,5} \approx 1,1$, то можно утверждать, что однофазный стержневой трансформатор будет примерно на 10% легче и будет иметь на 10% меньшие потери, чем трехфазный той же мощности. Таблица трансформаторов завода Элин (ELIN) хорошо иллюстрирует вышесказанное (табл. 1).

3. Номинальная мощность. Номинальная мощность трансформатора указывается обычно в киловольтамперах или — для малых трансформаторов — в вольтамперах и обозначается на щитке трансформатора. Для однофазного трансформатора она равна $P = U \cdot I \cdot 10^{-3}$ kVA, а для трехфазного $P = U \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot 10^{-3}$. Мощности первичная и вторичная при этом условно считаются одинаковыми и равными номинальной мощности P ; потери трансформатора, ток холостого хода и изменение напряжения при этом не учитываются. Номинальные напряжения указываются условно те же, которые имеют место при холостом ходе, а номинальные токи рассчитывают, исходя из равенства ампервитков первичной и вторичной обмотки (см. еще § 15).

Мощность современных трансформаторов колеблется в больших пределах — от нескольких вольтампер до 100 000 kVA в одной единице. Несомненно, расчет и конструирование ведутся весьма различно для трансформаторов мелких и трансформаторов мощных. Для последних возникает ряд проблем: усилия в обмотках при коротких замыканиях, явления перенапряжений, отведение тепла как от частей трансформатора к охлаждающему маслу, так и от последнего к охлаждающей среде, вопросы предельных габаритов и многие другие, которые для мелких и сравнительно низковольтных трансформаторов или не возникают вовсе или разрешаются сравнительно просто. Одним из таких интересных вопросов является вопрос о предельной возможной мощности трансформаторов [Л. 25, стр. 446].

¹ См. также ниже — „Номинальные напряжения“.

Т а б л и ц а 1
А. Сухие трансформаторы фирмы ELIN

P kVA	1			2			3			
	Данные для трех- фазных трансфор- маторов 6 kV, 50 Hz (по каталогу)			Уменьшенные на 10 ⁰ / ₀ значения 1-го столбца для однофазных транс- форматоров той же мощности			Данные для однофазных трансформаторов 6 kV, 50 Hz (по каталогу)			
	P_0 W	P_k ‰	G_{mp} kG	P_0 W	P_k ‰	G_{mp} kG	P kVA	P_0 W	P_k ‰	G_{mp} kG
50	570	1,75	470	515	1,58	423	65 85 110 135	540 670 760 880	1,45 1,35 1,35 1,2	470 590 730 890
70	700	1,6	635	630	1,44	572				
95	850	1,42	800	765	1,28	720				
125	1050	1,32	1000	945	1,19	900				
160	1200	1,25	1250	1080	1,13	1125				

В. Масляные трансформаторы фирмы ELIN

P kVA	1				2				3				
	Данные трехфазных трансформаторов 10 kV, 50 Hz (по ката- логу)				Уменьшенные на 10 ⁰ / ₀ значения 1-го столб- ца для однофазных трансформаторов той же мощности				Данные для однофазных трансформаторов 10 kV, 50 Hz (по каталогу)				
	P_0 W	P_k ‰	G_{mp} kG	G_{mc} kG	P_0 W	P_k ‰	G_{mp} kG	G_{mc} kG	P kVA	P_0 W	P_k ‰	G_{mp} kG	G_{mc} kG
75	650	2,4	630	340	585	2,2	570	306	90 115 140 175	620 750 880 1030	2,2 2,15 2,05 2,0	650 750 920 1080	335 400 485 580
100	860	2,3	780	430	720	2,1	700	390					
130	970	2,2	950	540	875	2,0	855	485					
170	1140	2,1	1140	660	1025	1,9	1025	595					

Стандартные мощности нормальных силовых трансформаторов — см. ОСТ 2524 и табл. I и II в приложении.

4. Номинальные напряжения. До введения стандарта на напряжения (ОСТ 4760), трансформаторы строились на самые различные напряжения, хотя и очень близкие между собой, например 208, 210, 215, 220, 225, 230 V. Дело это теперь упорядочено; номинальные напряжения для трансформаторов — см. ОСТ 2524.

Не лишним будет еще раз повторить (§ 5, п. 3), что номинальные напряжения понимаются при холостом ходе трансформатора, если не сделано особого указания. Это важно иметь в виду во избежание всяких недоразумений с заказчиком трансформатора. При нагрузке напряжения будут изменяться (§ 78)-

Свойства трансформаторов в значительной степени определяются величиной номинального (а также испытательного) напряжения и изменяются следующим образом по мере роста номинального напряжения.

1. Изоляция отдельных витков и катушек увеличивается (§ 60 и 61).

2. Увеличиваются изоляционные расстояния от обмотки высшего напряжения до других обмоток и до прочих (заземленных) частей трансформатора, как то: сердечник, станина, бак и т. д. (§ 63); вследствие этого сильно увеличивается длина l_c магнитной цепи.

3. Числа витков обмоток увеличиваются согласно основной формуле э. д. с. (§ 37), а для того чтобы индуктивность трансформатора, пропорциональная квадрату числа витков, при этом не возрастала чрезмерно, приходится увеличивать магнитный поток Φ , а значит и сечение S сердечника, так как $\Phi = B \cdot S$; величину же индукции B приходится выбирать в узких пределах (§ 26).

4. Увеличение l_c ведет к повышению процентного значения тока холостого хода i_0 %.

5. Увеличение S и l_c влечет за собой увеличение веса сердечника G_c и потерь P_c в нем.

6. От причины, указанной в п. 2, увеличивается средняя длина l_w витков обмоток, а от причины, указанной в п. 1, приходится снижать плотность тока, для того чтобы усиленно изолированная обмотка не перегревалась; в результате вес обмотки G_m сильно увеличивается.

7. Поэтому, хотя плотность тока Δ и снижается, но потери в меди P (§ 71, формула 110) все же увеличиваются, а вместе с тем увеличивается и величина e_r (§ 77, формула 130).

8. От причин, указанных в п. 5 и 7, к п. д. η трансформатора уменьшается (§ 75, формула 123).

9. Индуктивность трансформатора e_s возрастает, так как увеличивается величина δ_s (§ 53, формула 61), хотя величина e_w , входящая в знаменатель этой формулы, и увеличивается от увеличения Φ (п. 3); вместе с индуктивностью трансформатора

растет и напряжение короткого замыкания $e_k = \sqrt{e_r^2 + e_s^2} \%$.

10. От увеличения размеров l_c и S магнитной цепи и обмоток увеличиваются размеры всего трансформатора и его бака.

11. Увеличение размеров активной части влечет за собой увеличение веса всего трансформатора.

12. Увеличение размеров бака ведет к увеличению веса масла.

Из вышеизложенного понятно, что для каждого рассчитываемого трансформатора прежде всего следует установить, является ли он нормальным по своим напряжениям, или же отклоняется в сторону сравнительно высоковольтных или низковольтных трансформаторов.

Согласно теории соразмерности трансформаторов [Л. 47, стр. 18], всякой номинальной мощности P соответствует некоторое „оптимальное“ высшее напряжение U_1 , причем $U_1 \equiv \sqrt[4]{P}$. Если, например, для трансформатора с естественным масляным охлаждением мощностью 10 kVA принять за номинальное напряжение 10 kV, то трансформатору в 20000 kVA будет „свойственно“ иметь напряжение:

$$U_1 = 10 \sqrt[4]{\frac{20\,000}{10}} \approx 66 \text{ kV}.$$

Поэтому, например, можно сразу утверждать, что следующие трансформаторы не являются по своим напряжениям нормальными:

100 kVA на 100 kV — высоковольтный (испытательный),
5000 kVA на 100 V — низковольтный (печной).

Конечно, указанная зависимость дает лишь порядок величины оптимального напряжения, однако самое существование такого оптимального напряжения понятно, так как, например, для малого трансформатора токи в тысячи ампер являются ненормальными из-за трудности устройства обмотки; точно также ненормальными для него являются и напряжения в десятки и сотни киловольт, требующие несоразмерно большого количества изоляции и больших изоляционных расстояний, в то время как сама активная медь занимает сравнительно мало места.

5. Частота. В СССР редко приходится проектировать трансформаторы для частоты, отличной от 50 Hz; в области индукционных печей встречается частота 500 и 1000 Hz; десятками и сотнями тысяч герц считается частота радиотрансформаторов. Значение удельных потерь в стали при повышенных частотах см. § 68.

Если трансформатор приходится пересчитывать для другой частоты, несколько отличающейся от нормальной, то по данным SSW мощность определенной модели трансформатора будет изменяться с частотой следующим образом:

Частота	60	50	45	42	40 Hz
Мощность	110	100	90	84	80%

За границей для однофазных железных дорог употребительны

частоты 15 и $16 \frac{2}{3}$ Hz; данные для таких трансформаторов, конечно, несравнимы с данными трансформаторов на 50 Hz без специальных пересчетов.

В США частота 60 Hz более распространена, чем 50 Hz; поэтому, имея дело с американскими расчетами и данными об американских трансформаторах, надо обращать внимание на то, к какой частоте эти данные относятся.

6. Схема и группа соединений обмоток; параллельная работа трансформаторов. Для трехфазных трансформаторов, как известно, указание одной только схемы соединения обмоток (Y, Δ , Z) недостаточно. В задании должна быть точно указана, или же выбрана проектирующим с полной мотивировкой, одна из групп соединений. В противном случае могут выйти большие недоразумения, в особенности, если проектируемый трансформатор предназначается для параллельной работы с уже имеющимися.

Для параллельной работы двух трехфазных трансформаторов, кроме равенства первичных и вторичных напряжений и равенства напряжений короткого замыкания e'_k и e''_k ,¹ необходимо еще, чтобы схемы соединений обмоток относились к одной и той же группе соединений (табл. 2). Таблица эта содержит лишь наиболее употребительные схемы; общее число возможных комбинаций достигает 30 [Л. 16, стр. 181—183].

Цифра в обозначении группы соединений (12, 6, 5 или 11) показывает, на сколько раз по 30° смещены вектора соответствующих фазных напряжений обеих обмоток. Положение векторов при этом совпадает с положением обеих стрелок на циферблате часов, указывающих 12 час., 6 час. и т. д., для группы соединений 12 или 6 и т. д.

При выполнении соединений нужно точно следовать табл. 2; в частности обратить внимание на то, что для получения группы 11 соединение обмоток в треугольник будет разным для групп $\Delta/Y—11$ и $Y/\Delta—11$.

Для однофазных трансформаторов параллельная работа достаточно обеспечивается соблюдением двух первых условий (см. выше) и совпадением по фазе э. д. с. параллельно включаемых обмоток.

Для трехобмоточных трансформаторов вместо второго условия должна быть соблюдена тождественность эквивалентных трехлучевых схем (§ 21) [Л. 25, стр. 487].

О преимуществах и недостатках различных схем соединения обмоток см. общие курсы трансформаторов, а также СЭТ, § 38—45. В тех случаях, когда проектирующему предоставляется самому выбрать схему соединения, можно руководствоваться следующим общим указанием.

Чем выше напряжение обмотки, тем больше оснований соединять ее в Y у трехфазных трансформаторов и соединять

¹ Допускаются расхождения на $\pm 10\%$ от среднего значения.

Таблица 2

Обозначения групп соединений		Угловое смещение	Диаграммы векторов		Схема соединений	
			высшее напряжение	низшее напряжение	высшее напряжение	низшее напряжение
12	$\Delta/\Delta-12$	0°				
	Y/Y-12 нормальн.					
	$\Delta/Z-12$					
6	$\Delta/\Delta-6$	180°				
	Y/Y-6					
	$\Delta/Z-6$					
5	$\Delta/Y-5$	150°				
	Y/Delta-5					
	$\Delta/Z-5$					
11	$\Delta/Y-11$ нормальн.	330°				
	Y/Delta-11 нормальн.					
	Y/Z-11 нормальн.					

обмотки двух стержней последовательно у однофазных, и наоборот — при больших токах — соединять обмотки в Δ у трехфазных трансформаторов и соединять обмотки двух стержней параллельно у однофазных.

Таким образом, соединение Y является типичным соединением высоковольтных обмоток трехфазных трансформаторов, или этих же обмоток трехфазной группы, тогда как соединение Δ применяется преимущественно для обмоток низшего напряжения. Как известно, соединение одной из обмоток в Δ необходимо у мощных трансформаторов для заглушения третьей гармоники в кривой вторичного напряжения. Соединение обеих обмоток в Y недопустимо у броневых трехфазных трансформаторов из-за появления третьей гармоники.

Соединение обмоток в Z , не являющееся стандартным, применяется редко, когда желательно иметь нулевую точку со стороны низшего напряжения, а применение схемы Y/Y_0 недопустимо по причине неравномерной загрузки фаз. Применение для одной из обмоток соединения в Z влечет за собой большую на 15% затрату меди для этой обмотки. При неравномерной загрузке фаз хорошие результаты дает схема Δ/Y_0 .

Стандартные схемы см. ОСТ 2524. О дальнейших деталях схем соединения см. § 36.

7. Система охлаждения. В задании должна быть указана система охлаждения, без чего невозможно рассчитывать трансформатор. Нормальные силовые трансформаторы по ОСТ 2524 имеют естественное масляное охлаждение при мощностях до 7500 kVA (трехфазные) и до 6667 kVA (однофазные). Небольшие трансформаторы, примерно до 200 kVA и до 3÷6kV, могут быть построены с естественным воздушным охлаждением. Мощные трансформаторы, начиная с 10 000 kVA, выполняются теперь чаще всего с масляным охлаждением и добавочным обдуванием бака воздухом (§ 102); сравнительно редко применяют для них систему с принудительной циркуляцией масла через отдельный охладитель с воздушным или водяным охлаждением (§ 104); внутреннее водяное охлаждение масла змеевиком внутри трансформатора (§ 103) теперь применяется редко. Совсем редко в специальных низковольтных трансформаторах (сварочных, нагревательных) применяется водяное охлаждение витков низковольтной обмотки. О классификации систем охлаждения см. § 2, п. 43 и 44.

8. Напряжение короткого замыкания. Величина напряжения короткого замыкания e_k бывает предписана непосредственно заданием, или может быть определена косвенно из требования параллельной работы рассчитываемого трансформатора с другим (или другими) заданным, или иногда — требованием определенного значения процентного изменения напряжения при определенном режиме работы (§ 18). Если таких указаний относительно величины e_k не дается, приходится обратиться к ОСТ 2524 или к данным о выполненных трансформаторах.

Вообще, чем выше номинальное напряжение трансформатора тем больше величина e_k ; согласно ОСТ 2524 при:

$U_1 = 6,6$	35	110	(220) kV
$e_k = 5,5$	7,5	10,5	(14) %

Величина e_k для данной модели трансформатора возрастает пропорционально мощности (§ 77). Поэтому, если одна и та же модель применяется на более высокое напряжение (с понижением мощности вследствие невозможности вместить обмотку с усиленной изоляцией), то вместе с понижением мощности обычно уменьшается и величина e_k . Наоборот, если мощность может быть повышена благодаря применению более эффективной системы охлаждения, то возрастает и величина e_k .

Поэтому у трансформаторов с естественным воздушным охлаждением величина e_k обычно ниже, чем при масляном охлаждении из-за более слабого использования данной модели трансформатора.

9. К. п. д. трансформатора. Величина к. п. д. η трансформатора или бывает непосредственно задана, или ее приходится выбирать, ориентируясь на данные таблиц (см., например, табл. I и II в приложении), каталогов или на данные о других, выполненных уже, трансформаторах, подходящих по типу, мощности, напряжению, системе охлаждения и т. д.

При этом следует руководствоваться следующими соображениями. При прочих равных условиях:

- 1) чем больше мощность трансформатора, тем выше к. п. д.,
- 2) чем выше рабочее напряжение, тем ниже к. п. д.,
- 3) чем больше электромагнитные загрузки B и Δ трансформатора, чем более эффективна его система охлаждения, тем выше могут быть допущены потери и тем ниже будет к. п. д.,
- 4) при равной мощности и равных электромагнитных нагрузках к. п. д. однофазных трансформаторов несколько выше, чем трехфазных (п. 2 настоящего параграфа).

Трехфазный трансформатор по сравнению с группой из трех однофазных той же общей мощности имеет, при одинаковых B и Δ , больший к. п. д.

ГЛАВА V

РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ РАЗНЫХ ТИПОВ

§ 17. Расчет стержневого трансформатора

Из формуляра (§ 109, п. 10—21) нетрудно усмотреть, что центр тяжести предварительного расчета стержневого трансформатора лежит в определении основной расчетной величины e_w на основе требуемой индуктивности трансформатора, допустимого значения величин q_1 и q_2 (п. 13) и законов „гармонического“ трансформатора (п. 19).

Для небольших трансформаторов с простыми, без каналов, обмотками из цилиндрических катушек достаточно взаимно увязать (п. 16) величины Δ , q и радиальный размер обмоток для обеспечения охлаждения последних. Охлаждение обмоток мощных трансформаторов всегда может быть обеспечено путем подразделения обмоток достаточным числом каналов (§ 85); поэтому критерием правильности предварительного расчета в этом случае является величина отношения l/d (п. 37).

При первом расчете часто получаются слишком большие или же слишком малые размеры L и l . В этом случае надо пересмотреть расчеты, изменяя немного те из величин, которые сильнее всего влияют на расчет, т. е. величины d , e_w , а иногда и выбранные электромагнитные загрузки (B и Δ). Поскольку при постоянной индукции $e_w \equiv S$, а сама величина e_w входит в расчеты в квадрате (§ 53, формулы 61 и 64), весьма небольшим изменением d можно регулировать расчет в желаемом направлении, не отступая далеко от условий „гармонического“ трансформатора (§ 10). Надо помнить, что увеличение d влечет за собой уменьшение l и L , чем будет затруднено охлаждение обмоток. Кроме того, трансформаторы с сравнительно короткими стержнями и большими диаметрами обмоток имеют и больший вес и повышенные потери.

При заводском проектировании возможность изменения d лимитируется наличием нормальных оправок для обмоток и, что еще более важно, наличием нормальных цилиндров и угловых шайб (см. также § 12).

При реже применяемой прямоугольной форме сечения стержней можно варьировать расчет, изменяя толщину h пакета стержня, а вместе с тем и величины S и e_w .

Во время предварительного расчета надо сравнивать получаемые данные с требованиями задания и с данными о выполненных трансформаторах (см., например, табл. I и II в приложении).

Предварительный расчет заканчивается детальным проектированием обмоток. При этом иногда приходится несколько изменить размеры сердечника, так как ОСТ 8616 на обмоточную медь ограничивает выбор размеров сечения провода.

При окончательном расчете (п. 43—130) основные размеры трансформатора уже не меняются; определяются его электрические и прочие характеристики, проверяется соответствие его условиям задания (§ 14), общим техническим требованиям (§ 11) и проводится сравнение с данными предварительного расчета.

§ 18. Расчет броневых трансформаторов

Предварительный расчет броневых трансформаторов (а также стержневого с чередующимися обмотками) требует несколько иного подхода, чем расчет обычного стержневого трансформатора с концентрическими обмотками. Во-первых потому, что в расчеты входит еще одна неизвестная — число p полных групп,

на которые подразделены обмотки, а во-вторых потому, что в этом случае невозможно даже приблизительно наметить конфигурацию окна трансформатора без расчета обмоток. Лишь в начале расчет ведется аналогично расчету по формуляру (§ 109); выясняются основные параметры трансформатора, выбираются электромагнитные загрузки и увязывается в основном вопрос об охлаждении обмоток. Затем определяются: сечение стержня по формуле Арнольда (§ 31) и величина e_w . Далее определяется возможная длина l_w витка и (по формуле 64) значение произведения $p \cdot l_1$ (на основе вычисленной в п. 9 величины e_s). Произведение $p \cdot l_1$ можно разложить на оба сомножителя путем проб. Для однофазных броневых трансформаторов p равно 2 или 3 (редко 1 или 4); для трехфазных обычно $p = 2$. Показателем правильности выбора величины p служит получающееся значение высоты (в данном случае радиального размера) катушек $l_1 \approx l_2$.¹

При мощностях	100 ÷ 400 kVA	$l_1 \approx 10 \div 15$ см.
" "	500 ÷ 2000 "	$l_1 \approx 15 \div 25$ "
" "	2000 ÷ 10000 "	$l_1 \approx 25 \div 40$ "

Следует избегать брать $p = 1$, так как при этом можно опасаться больших добавочных потерь в обмотках. Определив примерный размер l_1 , можно произвести детальный расчет обмоток, а потом приступить и к детальному расчету всего трансформатора.

Надо помнить, что наилучшим типом обмотки для обычных броневых трансформаторов является обмотка из дисковых катушек с одним витком в слое из провода (или проводов) прямоугольного сечения, а не многорядные катушки из круглого провода. Это отчасти и определяет область применения броневых трансформаторов — область средних и больших токов (см. еще § 16).

В заключение можно сказать, что броневой трансформатор с concentрическими обмотками по рис. 5 можно рассчитывать по формуляру стержневого трансформатора, полагая лишь число активных стержней $s = 1$.

§ 19. Расчет серий трансформаторов

Серия трансформаторов есть ряд трансформаторов на одни и те же номинальные напряжения с мощностями, увеличивающимися от наименьшей до наибольшей по определенному закону. Свойства членов такого ряда связаны между собой зависимостями, вытекающими в основном из законов „геометрии“ трансформаторов (§ 9); см. также [Л. 34].

При проектировании серии трансформаторов п. 1, 3, 9 и 12 практического задания (§ 14) будут одинаковы для всех трансформаторов данной серии. Рассмотрим остальные пункты.

2. Обычно мощности возрастают ступенями, примерно в 1,25 ÷ 1,75 раза. Шкала мощностей трансформаторов может

¹ При $U_1 \geq 40$ kV делают $l_1 < l_2$.

быть поставлена в связь с интенсивностью общего процесса электрификации в данной стране. Чем интенсивнее протекает этот процесс, тем менее смысла имеет мелкая градация в шкале мощностей. В СССР согласно ОСТ 2524 между мощностями 5 kVA и 1000 kVA содержится 13 промежуточных мощностей, тогда как довоенные каталоги содержали 27 мощностей.

10. Величина e_k выбирается так, чтобы трансформаторы данной серии могли работать между собой параллельно (см. также § 16, п. 6). Проще всего взять e_k одинаковым у всех трансформаторов серии. Но короткие замыкания в более мощных цепях сопровождаются гораздо более разрушительными последствиями (§ 105—107); поэтому величину e_k иногда несколько увеличивают по мере роста мощности.

11. Совершенно понятно, что значения к. п. д. должны возрастать по мере роста мощности.

Отсылая интересующихся за дальнейшими подробностями к [Л. 34, 44, 45 и 47], можно лишь отметить, что при проектировании серий трансформаторов приходится по мере роста мощности увеличивать и электромагнитные загрузки (главным образом плотность тока), для того чтобы сэкономить как на весе меди, так и на размерах и на весе трансформатора и масла; приходится усложнять конструкции как обмоток, так и сердечника путем устройства каналов (§ 85), создающих добавочные поверхности охлаждения, и т. д.

§ 20. Особенности расчета автотрансформаторов

При расчете автотрансформаторов следует иметь в виду следующие их свойства (предполагаются понижающие автотрансформаторы со схемой по рис. 21, I, как более распространенные).

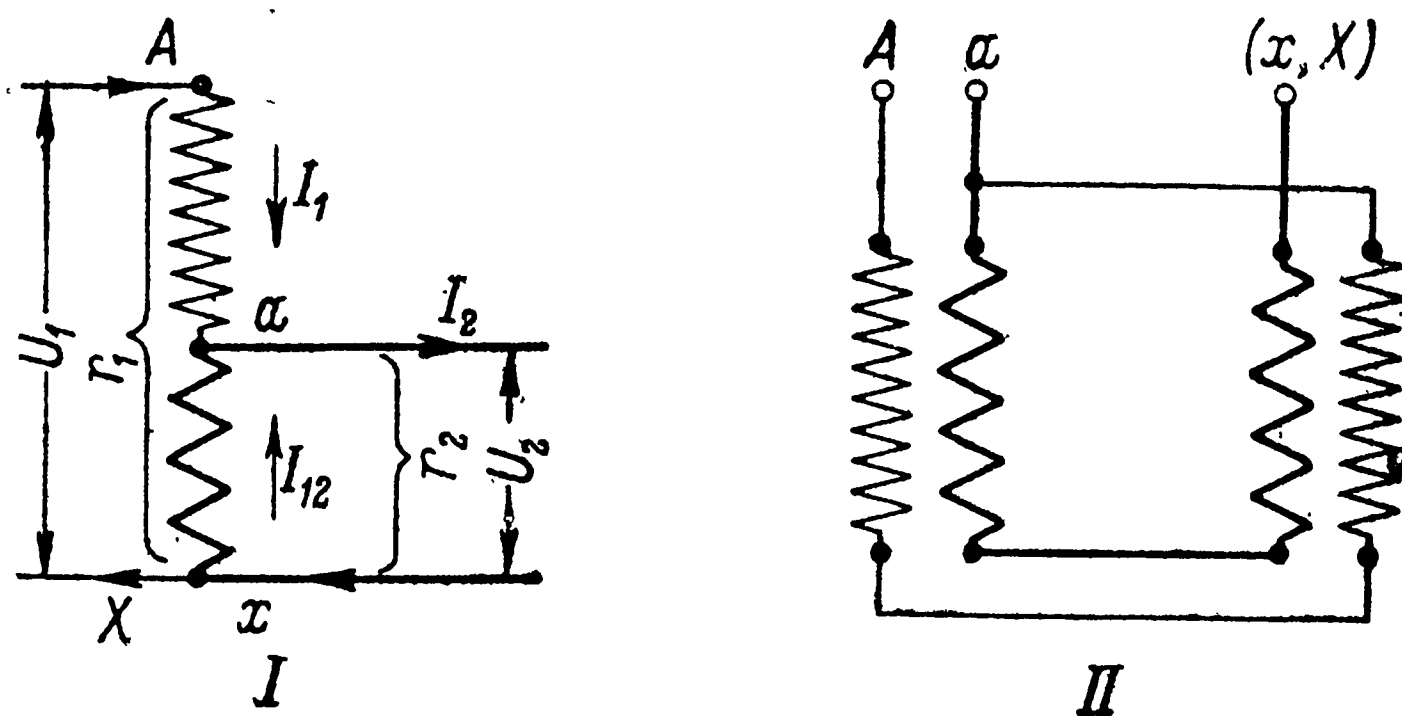


Рис. 21. Схемы соединения понижительного однофазного автотрансформатора: I — схема теоретическая; II — схема действительная.

1. Типовая мощность, т. е. мощность P модели трансформатора, применяемого в качестве автотрансформатора с мощностью P' , будет равна:

$$P = P' \left(1 - \frac{U_2}{U_1} \right) = P' \left(1 - \frac{1}{k_{12}} \right), \quad (31)$$

где

$$k_{12} = \frac{U_1}{U_2} \geq 1.$$

2. Ток I_{12} в общей части обмотки составляет разность вторичного и первичного токов:

$$I_{12} = I_2 - I_1, \quad (32)$$

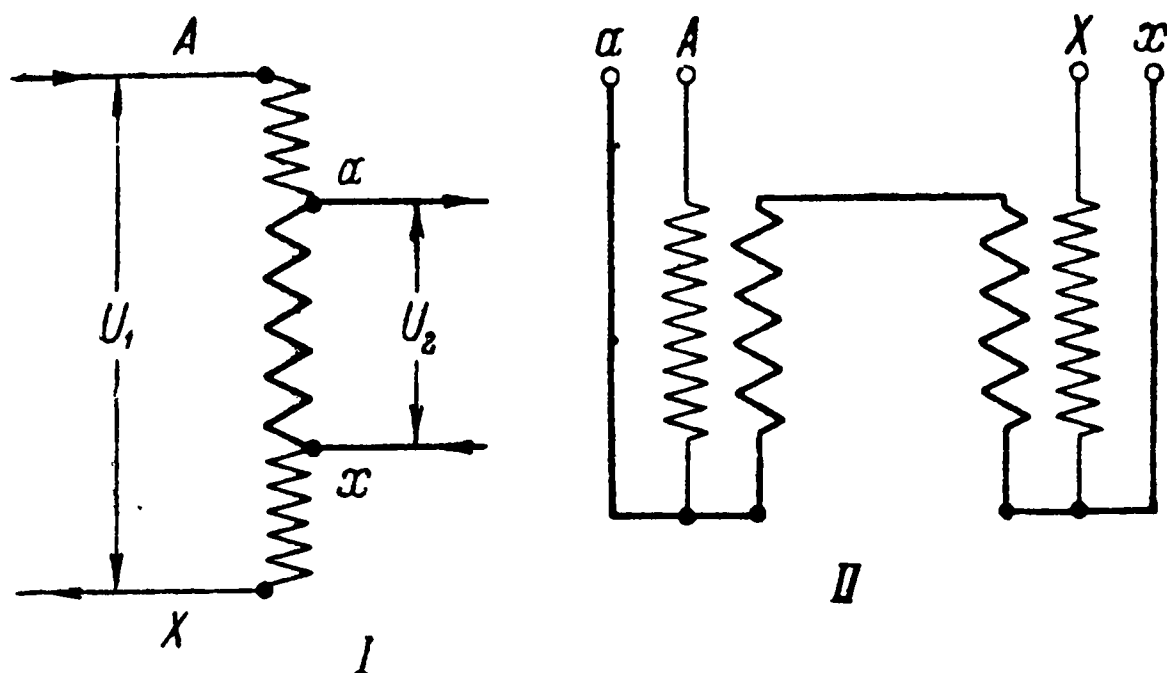


Рис. 22. Другая разновидность схем соединения однофазного автотрансформатора: I—схема теоретическая; II—схема действительная.

где $I_2 \geq I_1$; разность — алгебраическая, если пренебречь намагничивающим током.¹

3. Относительно взаимного расположения частей обмоток Aa и ax должно быть соблюдено сказанное в § 53 относительно обмоток, несущих токи, сдвинутые по фазе (в данном случае на 180°). При цилиндрических обмотках части Aa и ax должны быть рас-

положены концентрически, но отнюдь не так, как указано схематически на рис. 21, I, что создало бы ненормально большую индуктивность.

Действительное расположение обмоток однофазного автотрансформатора на двух стержнях показано на рис. 21, II. Возможна, конечно, схема по рис. 22, I и соответствующее ей расположение по рис. 22, II.

4. При одинаковых плотностях тока отношение весов меди: G'_m автотрансформатора и G_m — равного ему по мощности трансформатора будет:

$$\frac{G'_m}{G_m} = \frac{(w_1 - w_2) I_1 + (I_2 - I_1) w_2}{w_1 I_1 + w_2 I_2} = \frac{w_1 - w_2}{w_1} = \frac{U_1 - U_2}{U_1} = 1 - \frac{1}{k_{12}}. \quad (33)$$

Примерно в обратном этому отношении между собой находятся у автотрансформаторов и равновеликих им по мощности трансформаторов: а) общие потери, б) активные, индуктивные и пол-

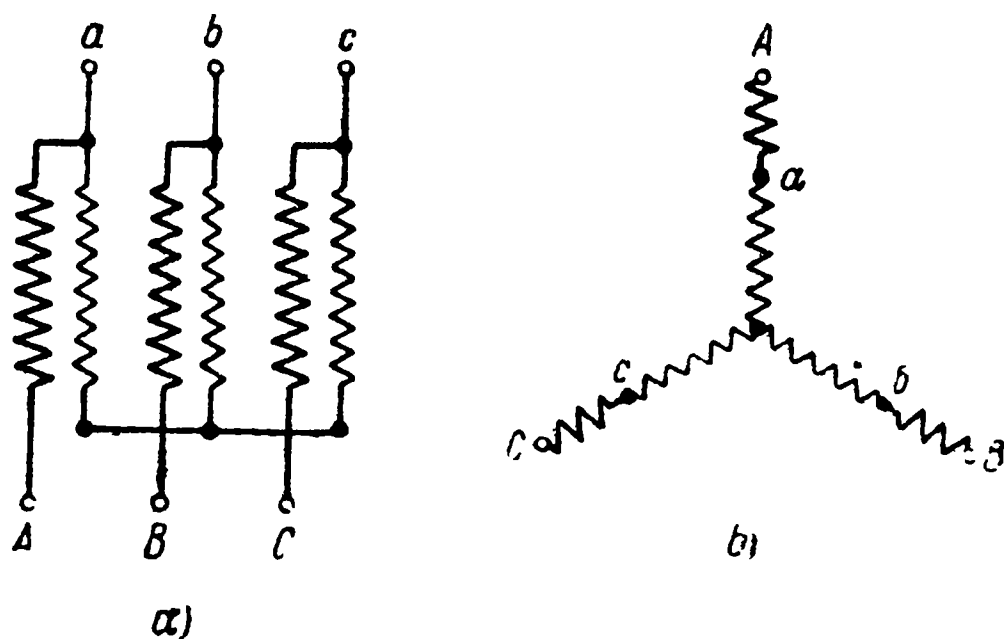


Рис. 23. Соединение в звезду обмоток трехфазного автотрансформатора: а — схема соединений; б — развернутая схема.

¹ Между прочим у автотрансформатора это можно сделать не всегда; подробно см. [Л. 1, стр. 93].

ные сопротивления, с) напряжения короткого замыкания и d) токи холостого хода.

5. Изменение напряжения автотрансформатора значительно меньше, чем для трансформатора с теми же параметрами P , U_1 , U_2 и пр. (см. ниже).

6. К. п. д. автотрансформатора η' больше, чем у равного по мощности трансформатора; для первого (рис. 21):

$$\eta' = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + I_1^2(r_1 - r_2) + (I_2 - I_1)^2 \cdot r_1 + P'_c},$$

где P'_c — потери в сердечнике; для второго:

$$\eta = \frac{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2}{U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + I_1^2 \cdot r_1 + I_2^2 \cdot r_2 + P_c}.$$

Ясно, что $\eta' > \eta$, так как у выражения для η' в знаменателе одно слагаемое такое же, как у η , а три других — меньше соответствующих слагаемых знаменателя у η .

7. Соответственно малой величине напряжения короткого замыкания токи короткого замыкания и действия их у автотрансформаторов гораздо значительнее, чем у трансформаторов той же мощности. Например, автотрансформатор мощностью 1000 kVA при $k_{12} = \frac{5}{4}$ имеет конструкцию и прочность трансформатора на 200 kVA,¹ но усилия в нем будут даже больше, чем у нормального трансформатора на 1000 kVA.

Вышеизложенное можно иллюстрировать следующим (упрощенным) расчетом для однофазного автотрансформатора по схеме рис. 21. Пусть:

$$\begin{aligned} P' &= 100 \text{ kVA}, & I_1 &= \frac{100 \cdot 10^3}{1000} = 100 \text{ A}, \\ k_{12} &= \frac{U_1}{U_2} = \frac{1000}{600} = 1,67, & I_2 &= \frac{100 \cdot 10^3}{600} = 167 \text{ A}, \\ 1 - \frac{1}{k_{12}} &= 0,4, & I_{12} &= I_2 - I_1 = 67 \text{ A}. \end{aligned}$$

Часть обмотки Aa должна быть рассчитана на 400 V и 100 A, общая же часть ax — на 600 V и 67 A. Типовая — она же передаваемая трансформаторным путем — мощность будет: $P = 100 \cdot 0,4 = 40 \text{ kVA}$; модель потребного трансформатора будет соответствовать мощности 40 kVA при напряжении 400/600 V. Такой трансформатор с естественным воздушным охлаждением, работая как обычный трансформатор, имеет следующие данные:

$$e_r = 1,90\%; \quad e_s = 1,97\%; \quad P_\Sigma = 1060 \text{ W}; \quad i_0 = 5\%.$$

Для него при полной нагрузке и $\cos \varphi_2 = 1$ изменение напряжения будет равно (§ 78):

$$\Delta u = e_r + \frac{e_s}{200} = 1,90 + 0,02 = 1,92\%.$$

¹ $1000 \left(1 - \frac{4}{5}\right) = 200.$

К. п. д. при полной нагрузке и $\cos \varphi_2 = 1$ будет равен:

$$\eta = 100 - \frac{1,06 \cdot 100}{40 + 1,06} = 97,45.$$

Как автотрансформатор мощностью 100 kVA он будет иметь такие параметры:

$$e'_r = 0,4 \cdot 1,9 = 0,76\%; \quad e'_s = 0,4 \cdot 1,97 = 0,79\%;$$

$$P'_\Sigma = 1060 \text{ W}; \quad i'_0 = 0,4 \cdot 5 = 2\%;$$

$$\eta' = 100 - \frac{1,06 \cdot 100}{100 + 1,06} = 98,95\%.$$

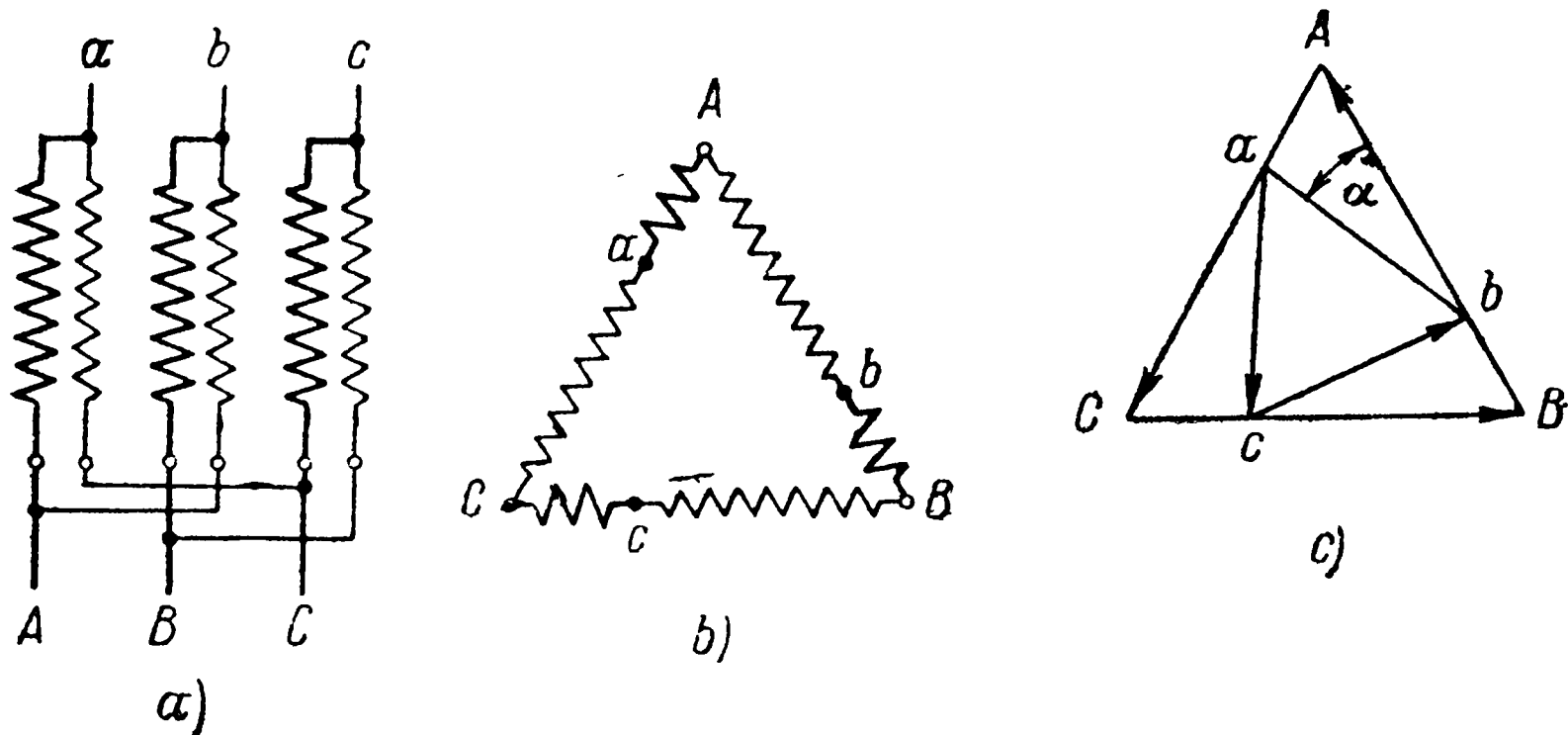


Рис. 24. Соединение в треугольник обмоток трехфазного автотрансформатора: *a* — схема соединений; *b* — развернутая схема; *c* — векторная диаграмма.

Что касается трехфазных автотрансформаторов, то для них возможны схемы соединения: Y по рис. 23, Δ по рис. 24 и так

называемый „продолженный треугольник“ по рис. 25. При соединении Y соотношение между мощностями P' и P то же, что и для однофазных единиц. При соединении Δ угол α сдвига фаз между первичными и вторичными напряжениями определяется по своему тангенсу:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{3} \frac{k_{12} - 1}{3 - k_{12}} \text{ (рис. 24), (34)}$$

где $k_{12} = AB/Ab$ — есть фазовый коэффициент трансформации. Линейный же коэффициент трансформации AB/ab не будет равен k_{12} , но будет равняться:

$$\frac{AB}{ab} = \frac{k_{12}}{\sqrt{k_{12}^2 - 3k_{12} + 3}}. \quad (35)$$

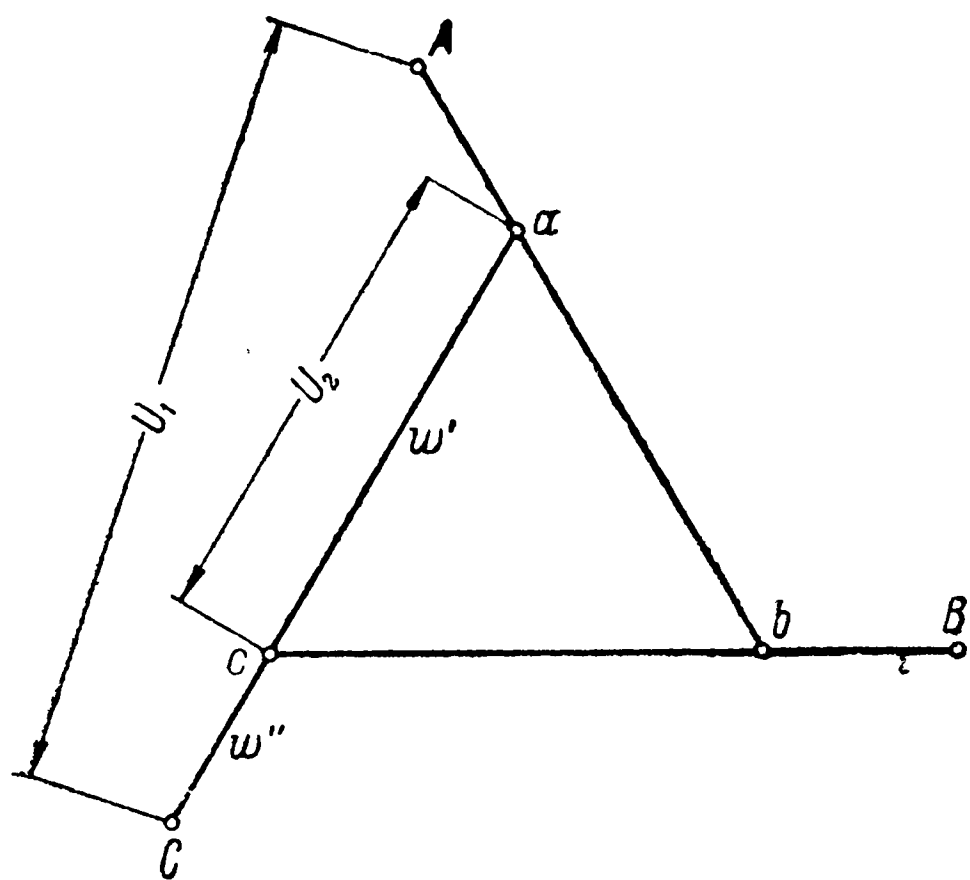


Рис. 25. Соединение обмоток трехфазного автотрансформатора „продолженным треугольником“.

Соотношение между мощностями будет следующее:

$$P = P' \cdot \frac{(k_{12} - 1) \cdot \sqrt{3}}{k_{12} \sqrt{k_{12}^2 + 3k_{12} + 3}}, \quad (36)$$

тогда как для однофазного автотрансформатора и трехфазного при соединении Y соотношение мощностей выражалось формулой (31).

При схеме „продолженного треугольника“, применяемой редко, линейный коэффициент трансформации (рис. 25):

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{k_{12}^2 + k_{12} + 1}}{k_{12} - 1}, \quad (37)$$

где попрежнему фазовый коэффициент трансформации $\frac{Ab}{ab} = k_{12}$. Соотношение между мощностями будет следующее:

$$P = P' \sqrt{\frac{3}{k_{12}^2 + k_{12} + 1}}. \quad (38)$$

См. также СЭТ, т. V, отд. 35, § 46—51.

§ 21. Особенности расчета трехобмоточных трансформаторов

1. В то время как мощность двухобмоточного трансформатора является одновременно мощностью каждой из его обмоток, для трехобмоточного трансформатора указывается в отдельности мощность каждой из трех его обмоток (1), (2) и (3) в виде условного отношения $P_1/P_2/P_3$. Эти три мощности, вообще говоря, могут находиться между собой в самых различных соотношениях, однако, согласно ОСТ 2524 стандартными являются только следующие соотношения: 100 : 100 : 100 или 100 : 100 : 66,7 или 100 : 66,7 : 66,7. Это требование ОСТа вызывается, с одной стороны, стремлением к унификации, с другой же стороны, должно побуждать потребителя идти на установку сравнительно сложных трехобмоточных трансформаторов только тогда, когда есть достаточная нагрузка для третьей обмотки. На малую мощность эту обмотку вообще трудно выполнить у мощных трансформаторов какими обычно являются трехобмоточные.

2. Хотя каждая из обмоток в отдельности рассчитывается на указанную выше (п. 1) процентную мощность, но весь в целом трехобмоточный трансформатор по ОСТ 2524 рассчитывается лишь для активных нагрузок, т. е. например, когда $P_2 + P_3 = P_1$

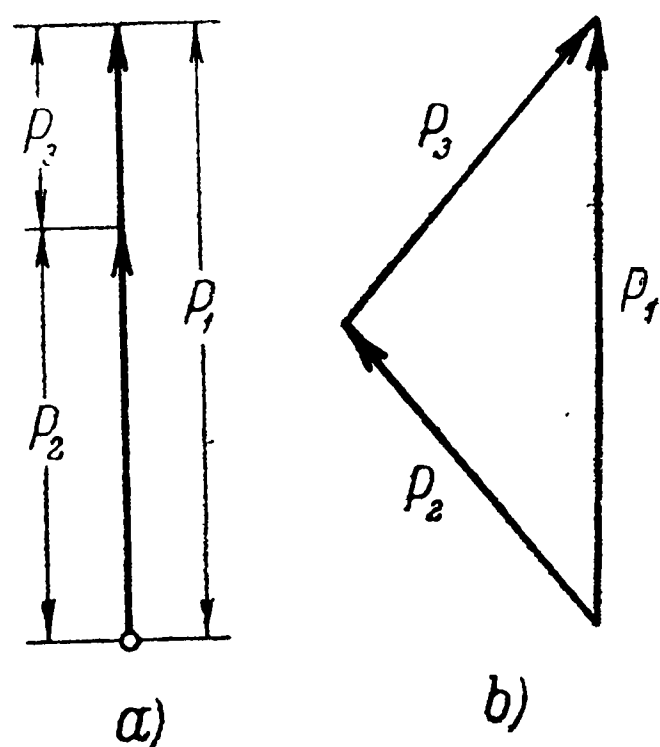


Рис. 26. Сложение мощностей в обмотках трехобмоточного трансформатора: а—вторичные нагрузки P_2 и P_3 чисто активные; б—нагрузки P_2 и P_3 складываются геометрически.

(рис. 26a), а не $\overline{P}_2 + \overline{P}_3 = \overline{P}_1$ (рис. 26b), где P_1 — нагрузка первичной обмотки. В первом случае потери P_Σ будут гораздо меньше.

3. Номинальной мощностью трехобмоточного трансформатора является мощность наиболее мощной из его обмоток (обычно P_1).

4. Типовой мощностью P трехобмоточного трансформатора условно считают полусумму из мощностей всех его обмоток, т. е.:

$$P = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{2}. \quad (39)$$

5. Двухобмоточный трансформатор, имея одну пару обмоток, имеет тем самым одно значение напряжения короткого замыкания $e_k\%$. Для трехобмоточного трансформатора должны быть заданы три значения этой величины: e_{k12} , e_{k13} и e_{k23} , соответственно трем возможным попарным комбинациям обмоток. При этом, поскольку напряжение короткого замыкания пропорционально мощности трансформатора (§ 77), и поскольку мощности всех трех обмоток могут быть различными (п. 1), должно быть указано, к какой именно мощности относятся данные значения e_k (обычно — к наибольшей из мощностей (P_1), если нет иного указания).

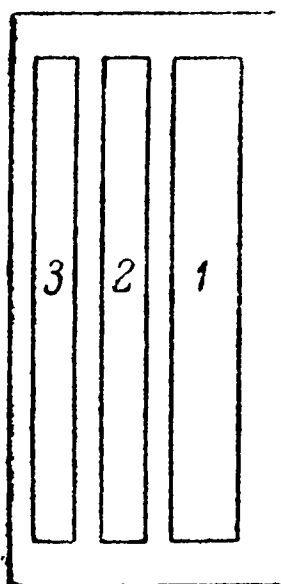


Рис. 27.
Взаимное
располо-
жение
обмоток
трехобмо-
точного
трансфор-
матора.

6. Из теории трехобмоточного трансформатора [Л. 3, стр. 115] известно, что для приведенных к одной мощности значений e_s и e_k и для расположения обмоток по рис. 27 будет справедливо соотношение $e_{s13} = e_{s12} + e_{s23}$ или, приблизительно, $e_{k13} \approx e_{k12} + e_{k23}$. Поскольку из конструктивных соображений высоковольтную обмотку (1) стараются всегда сделать наружной, напряжения короткого замыкания не могут быть назначаемы по произволу, но связаны всегда между собой указанным соотношением.

7. Из теории параллельной работы трехобмоточных трансформаторов [Л. 25, стр. 448] следует, что она наилучшим образом обеспечивается тогда, когда первичная обмотка лежит между двумя другими обмотками; см. также § 16, п. 6. Этим соображением пользуются при взаимном размещении обмоток.

С учетом сказанного в п. 1—7 расчет трехобмоточного трансформатора можно вести аналогично расчету трансформатора двухобмоточного (см. пример 3, § 112), начав с пары крайних обмоток и имея в виду, что осевой размер a_2 средней обмотки (2) входит в состав канала рассеяния δ_{s13} . Это налагает дополнительную связанность на все расчеты и стесняет „маневрирование“, так как надо помнить, что осевые длины всех трех обмоток должны быть равными. Особое внимание надо уделять расчету усилий при коротких замыканиях; усилия обычно бывают наи-

большими в том случае, когда трансформатор питается от двух обмоток, а на третьей происходит короткое замыкание [Л. 16, стр. 98; Л. 180, стр. 12].

§ 22. Особенности расчета некоторых специальных трансформаторов

Расчет многочисленных категорий специальных (ненормальных) трансформаторов имеет много своеобразных особенностей, но к сожалению не вмещается в рамки этой книги. Лишь для полноты изложения даются краткие указания для некоторых специальных трансформаторов, а также приводятся ссылки на литературу.

1. Трансформаторы для повторно-кратковременной нагрузки.

У трансформаторов для повторно-кратковременной нагрузки периоды нагрузки регулярно чередуются с периодами работы вхолостую или же с периодами полного выключения. Продолжительность всего цикла работы не должна превышать 5 мин.¹

Относительная продолжительность рабочей части цикла выражается в процентах и обозначается ПКР % (процент повторно-кратковременной работы). При такой нагрузке мощность трансформатора будет больше, чем при продолжительной нагрузке. Пусть увеличение будет в x раз.

Исходя из равенства эквивалентных потерь в меди и допуская, что обмотки и сердечник охлаждаются независимо друг от друга, можно написать:

$$P_m \cdot 100 = (\text{ПКР}\%) \cdot x^2 \cdot P_m,$$

откуда

$$x = \sqrt{\frac{100}{(\text{ПКР}\%)}}. \quad (40)$$

Например, трансформатор, работающий в течение 25%, т. е. $1/4$ рабочего цикла ($\text{ПКР}\% = 25$), может быть перегружаем вдвое,

¹ Обычно бывает гораздо меньше.

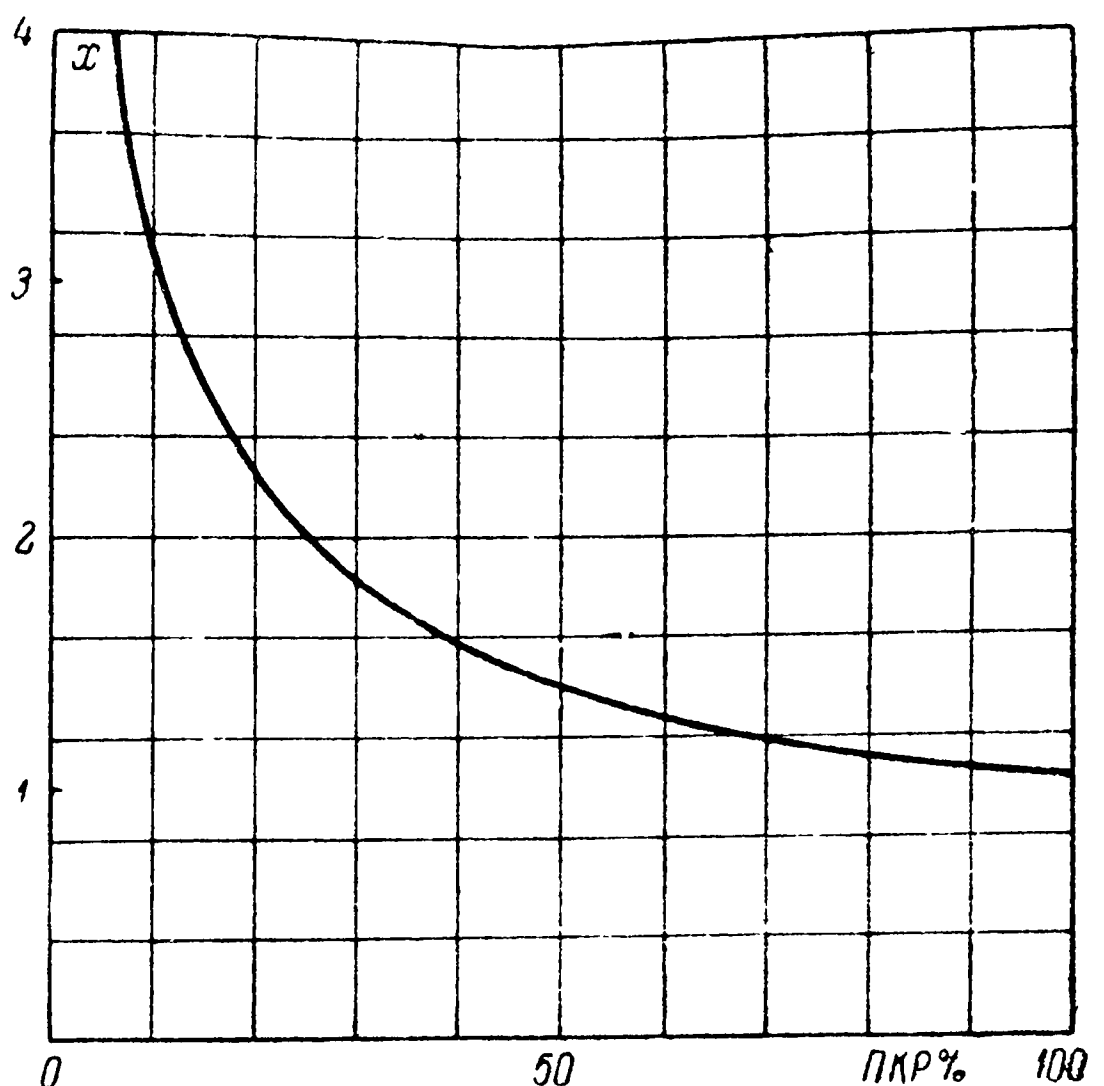


Рис. 28. Кратность x увеличения мощности трансформатора при повторно-кратковременном режиме и коротких циклах работы.

и обратно — для нагрузки, длящейся $1/4$ цикла, можно выбрать трансформатор вдвое меньшей мощности, чем потребовалось бы для такой же продолжительной нагрузки.

Зная требующуюся мощность и значение $\text{ПКР}\%$, можно определить и типовую мощность трансформатора, пользуясь кривой рис. 28, выражающей графически формулу (40). Так ведется расчет трансформаторов для сварочных аппаратов, для которых $\text{ПКР} = 10 \div 70\%$, причем во время перерывов они вовсе выключаются с первичной стороны, следовательно и сердечник трансформатора работает с тем же $\text{ПКР}\%$, что и его обмотки. Этим соответственно снижаются средние потери в сердечнике, вследствие чего индукция может быть повышена; однако она ограничивается возрастанием тока холостого хода. При $\text{ПКР} = 10 \div 25\%$ хорошим решением является применение для сердечника стали марки ЕС1А с большей магнитной проницаемостью (ср. кривые 1 и 2, рис. 129). Индукцию B выбирают в пределах $15\,000 \div 16\,000$ Gs на максимальной ступени; напряжение регулируется обычно с первичной стороны в пределах около 1:2. Конечно, при $\text{ПКР} \approx 70\%$ приходится брать сталь марки ЕС4А и обычные значения индукции B .

Сварочные трансформаторы имеют охлаждение естественное воздушное, а иногда — водяное охлаждение вторичного витка (обычно $w_2 = 1$).

2. Трансформаторы для ртутных выпрямителей (РВ). Это — нормальные трехфазные трансформаторы, но имеющие с вторичной стороны 6 или 12 фаз, подводимых к 6 или 12 анодам РВ, тогда как общая нулевая точка подводится к катоду.

Поскольку с первичной стороны трансформатор питается синусоидальным напряжением, расчет сердечника в отношении индукции, потерь и величины e_w ничем не отличается от расчета для обычных трансформаторов, но с обмотками дело обстоит иначе. Вследствие вентильного действия РВ каждый анод работает только в течение части периода; поэтому каждая фаза вторичной обмотки трансформатора находится под током только часть периода. В результате этого номинальная мощность в киловольтамперах вторичных обмоток больше таковой для обмотки первичной; кроме того, токи неправильны по форме и не синусоидальны.

Для каждой из различных применяемых схем [Л. 49 и 50] определяются эффективные значения токов, а по ним выбирается типовая мощность трансформатора, рассчитываются обмотки, потери в них и т. д.

Влияние индуктивности трансформатора на напряжение выпрямленного тока сильнее, чем ее влияние на вторичное напряжение у обычных трансформаторов; поэтому желательно иметь небольшую индуктивность. Вследствие своеобразия процессов, происходящих в РВ, вторичные обмотки трансформаторов подвергаются значительно большим перенапряжениям, чем это имеет место для обмоток обычных трансформаторов на те же напряжения.

Но главное внимание при расчете трансформаторов для РВ приходится уделять обеспечению механической прочности обмоток при „обратных зажиганиях“ в РВ, когда случайно, вследствие многих причин, один из анодов мгновенно делается катодом, и ток от других анодов начинает протекать к тому, на котором случилось обратное зажигание. Происходящие при этом толчки тока и усилия, действующие на обмотки, могут быть больше, чем те же явления при симметричных коротких замыканиях в обычных трансформаторах. В фазной обмотке, питающей обратное зажигание, ток меняет направление, и она начинает отталкиваться от других вторичных обмоток подобно обмотке первичной. Поэтому все вторичные обмотки — их две или четыре — одного стержня должны быть расположены взаимно симметрично (определение см. § 2, п. 27). Например, для двенадцатифазного трансформатора расположение обмоток по рис. 29*b* — правильное, а по рис. 29*a* — неправильное; см. еще [Л. 51 и 52]. Трансформаторы для РВ должны удовлетворять требованиям ОСТ 6303.

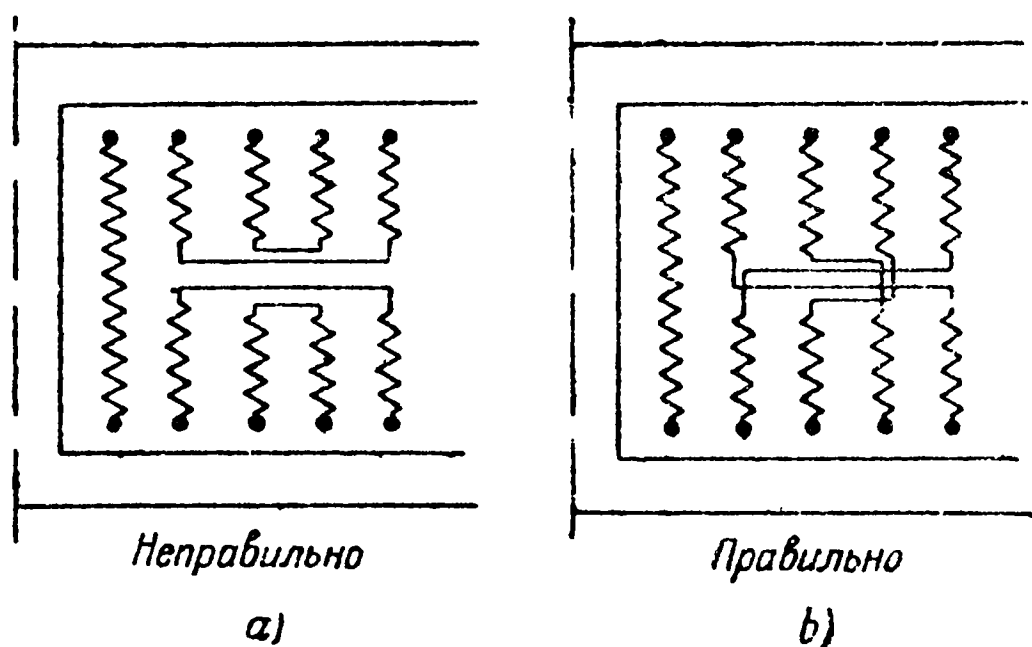


Рис. 29. Неправильное (а) и правильное (б) соединение обмоток трансформатора для ртутных выпрямителей.

3. Трансформаторы для электропечей. Это типичные низковольтные трансформаторы, одно- или трехфазные, типов броневые или стержневые, часто значительной мощности, на огромные вторичные токи. Им приходится обычно работать с большими толчками нагрузки в тяжелых условиях горячих металлургических цехов.

К этим трансформаторам предъявляются следующие требования: 1) регулировка напряжения примерно в отношении 1:2 с удобным переключением с первичной стороны, 2) стойкость против частых коротких замыканий, 3) большая способность к перегрузкам и 4) нечувствительность к загрязнению. Индуктивность печных трансформаторов составляет $5 \div 10\%$. На рис. 44 изображена выемная часть печного однофазного броневых трансформатора мощностью 2000 kVA, 11000/70—90 V.

Основными задачами проектирования печных трансформаторов являются: расчет и конструирование обмотки низшего напряжения (§ 50) с обеспечением ее охлаждения, то же — для шинных выводов (§ 54), а также рациональное устройство первичной обмотки для удовлетворения требований п. 1 и 2. Из-за требования 3 плотности тока берутся небольшие, порядка $2,2 \div 2,8 \text{ A/mm}^2$.

Для иллюстрации своеобразия параметров печных трансформаторов приводятся некоторые данные трансформаторов для

печей Миге [Л. 53]: $P = 11\,400\text{ kVA}$, $U_1/U_2 = 36\,750/27-58\text{ V}$, всего 57 ступеней регулировки; $I_2 = 245\,000\text{ A}$, $e_k = 5,73\%$, $P_c = 18,6\text{ kW}$, $P_m = 313\text{ kW}$, $\xi = 18,6/313 = 0,06$ (!). Сердечник этого броневого однофазного трансформатора по своей конструкции подобен сердечнику такого же трехфазного трансформатора (рис. 4), в шести окнах которого размещаются обмотки: главного трансформатора (без регулировки), автотрансформатора грубой регулировки (9 ступеней) и вольтодобавочного трансформатора тонкой регулировки (8 ступеней). О печных трансформаторах см. [Л. 54 и 55].

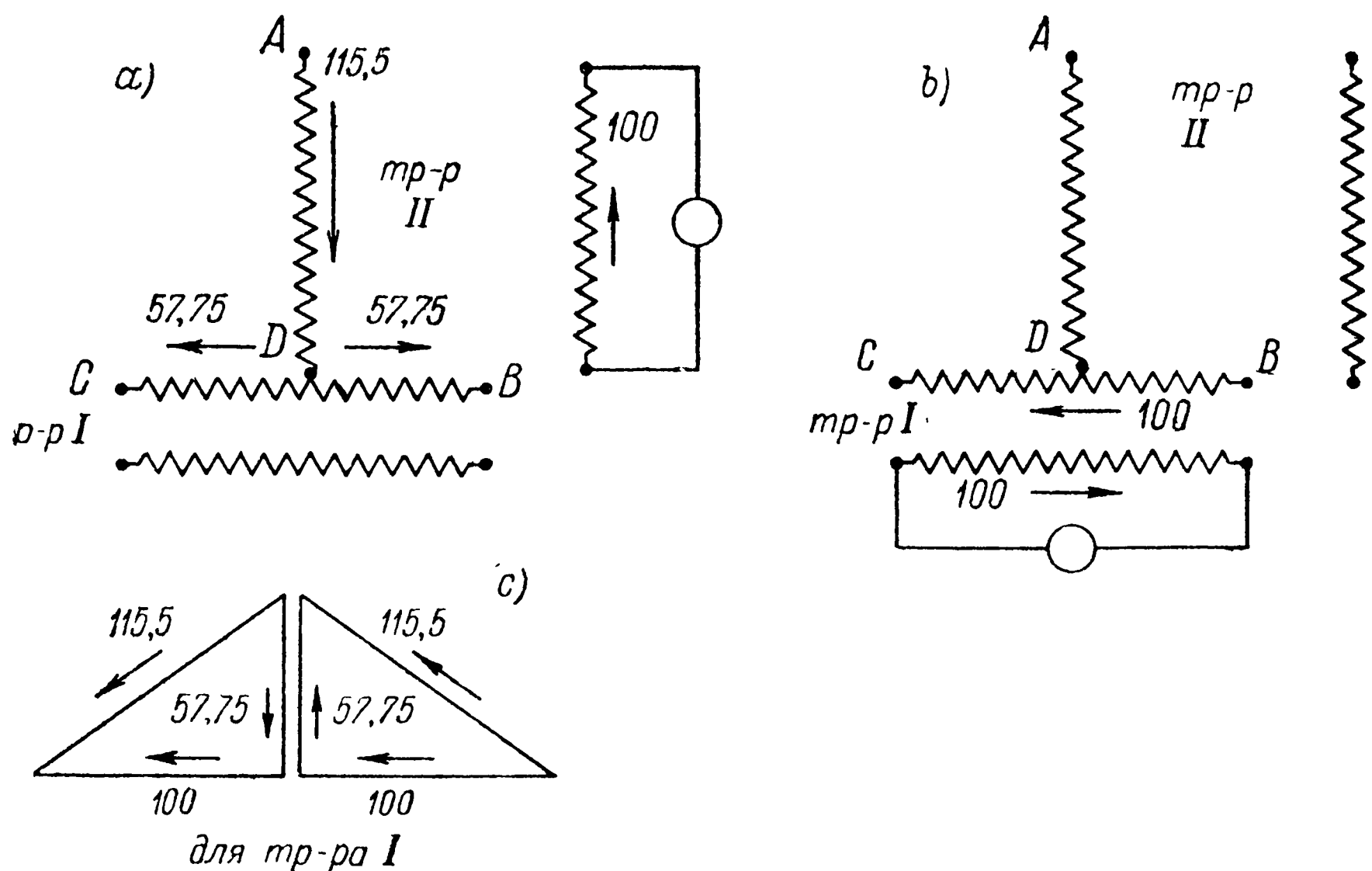


Рис. 30. Сложение токов в трансформаторах системы Скотта: *I* — главный трансформатор, *II* — добавочный трансформатор; *a* — нагружен только трансформатор *II*, *b* — нагружен только трансформатор *I*, *c* — сложение токов в обмотке *BC* трансформатора *I* при нагрузке обоих трансформаторов (цифры — токи в процентах).

4. Трансформаторы системы Скотта. При равных мощностях трансформаторов: *I* — главного и *II* — вспомогательного (рис. 30) первичное напряжение $AD = 0,866\ BC$. Поэтому, если пренебречь потерями в трансформаторах и токами холостого хода, и считать $\cos \varphi_2 = 1$ для обоих трансформаторов, то распределение токов полной нагрузки в процентах будет: при работе только одного трансформатора *II* — по рис. 30а, а при работе только одного трансформатора *I* — по рис. 30б. При работе обоих трансформаторов (как это обычно и бывает), сложение токов в обмотке *BC* представлено на рис. 30с. Таким образом, обе половины обмотки *BC* несут токи, сдвинутые по фазе на 180° при работе только одного трансформатора *II* и на 60° — при работе обоих трансформаторов. Поэтому к взаимному расположению этих половин

обмотки относится сказанное в § 53 (выводы, п. 4). Из рис. 30с видно, что при $\cos \varphi_2 = 1$ у обоих трансформаторов работа трансформатора I все же протекает при $\cos \varphi_1 = 100/115,5 = 0,867$. О системе Скотта см. еще [Л. 56—58]. Можно добавить, что из-за желания иметь общий резерв оба трансформатора обычно выполняются так, чтобы они могли работать то как главный I , то как вспомогательный II .

5. Трансформаторы малой мощности на невысокие напряжения. Расчет трансформаторов на мощность, выражающуюся в десятках или немногих сотнях вольтампер, при напряжениях в десятки или немногие сотни вольт (при 50 Hz), можно вести упрощенным путем. Для таких трансформаторов не играет роли величина e_k , так как они обычно не работают параллельно, почти не играют роли потери, к. п. д., усилия при коротких замыканиях и перенапряжения; не имеют места и добавочные потери в обмотках и других частях.

Зато более значительную роль начинает играть величина e_r по сравнению с e_s . Действительно:

$$e_r \equiv P^{-\frac{1}{4}} \quad (\S 9, \text{ п. } 9);$$

таким образом e_r при малых значениях P возрастает [довольно значительно и почти целиком определяет величину $e_k = \sqrt{e_r^2 + e_s^2}$, так как индуктивность e_s весьма мала, ибо мало и изоляционное расстояние δ_{12} между обмотками (§ 53, формула 63).

Большую роль начинает играть и величина i_0 — процентное значение тока холостого хода, которым часто пренебрегают при расчете нормальных трансформаторов. Действительно, согласно § 9, п. 1:

$$l \equiv P^{\frac{1}{4}}.$$

Таким образом, линейные размеры магнитной цепи уменьшаются гораздо медленнее, чем мощность трансформатора; что же касается величины зазора δ в стыках, то она, при одинаковом способе сборки сердечника, почти одна и та же для всех трансформаторов (§ 65). Поэтому относительная величина намагничивающей составляющей I_{op} тока холостого хода сильно возрастает. Индукцию B приходится снижать до 6000 ÷ 9000 Gs и выбирать сталь марки ЕСЗА для уменьшения I_{op} ; увеличение при этом потерь P_c в стали роли не играет, так как вес сердечника очень мал. Плотность тока Δ уменьшают, чтобы снизить потери P_m в меди и тем самым уменьшить значение e_r , ибо $e_r \equiv P_m$ при заданной мощности P трансформатора; уменьшение же потерь полезно и потому, что малые трансформаторы часто вообще бывают почти лишены охлаждения, работая внутри закрытых приборов и т. п.

Весь расчет малых трансформаторов можно расположить иначе и проще, чем приведено в формуляре § 109 и вести примерно так, как указано в примере 4 (§ 113).

Что касается других специальных трансформаторов, то для них ниже приводятся лишь некоторые ссылки на литературу. По расчету измерительных трансформаторов см.: трансформаторы тока [Л. 59—65], трансформаторы напряжения [Л. 59, 66, 67]; о трансформаторах для регулировки напряжения под нагрузкой см. [Л. 68—71], о нерезонирующих трансформаторах см. [Л. 72—74], о высоковольтных испытательных трансформаторах см. [Л. 75—79].

§ 23. Перерасчет готовых трансформаторов на другие данные

Этот случай встречается часто в практике эксплуатации трансформаторов, при их ремонте и т. д. Задача расчета при этом упрощается тем, что все данные трансформатора являются известными; но это же одновременно и усложняет расчеты из-за невозможности свободного выбора размеров и других расчетных величин.

Если на трансформаторе сохранился щиток со всеми данными, то дело перерасчета значительно упрощается. Если при этом сохранилась целиком хотя бы одна обмотка, и число витков ее можно сосчитать непосредственно, то можно определить в первую очередь величину:

$$e_w = \frac{E_{1\phi}}{w_1} = \frac{E_{2\phi}}{w_2},$$

а затем магнитный поток:

$$\Phi = \frac{e_w \cdot 10^6}{2,22}$$

(при $f = 50$ Hz). Измерив затем тщательно геометрическое сечение S' стержня, находят и активное его сечение $S = k_c \cdot S'$ (коэффициент k_c — см. § 27), а потом и индукцию:

$$B = \frac{\Phi}{S} \text{ Gs.}$$

Подсчитав токи $I_{1\phi}$ и $I_{2\phi}$ в обмотках и измерив микрометром сечения S_{m1} и S_{m2} провода обмоток, находят и плотности тока:

$$\Delta_1 = \frac{I_{1\phi}}{S_{m1}}; \quad \Delta_2 = \frac{I_{2\phi}}{S_{m2}}.$$

По найденным величинам e_w , Δ_1 и Δ_2 легко провести перерасчет трансформатора на новые данные, пользуясь хотя бы формуляром § 109, примерами 1—4 и прочими данными этой книги. При перерасчете важно сохранить прежние потери и условия охлаждения обмоток и сердечника, изоляционные расстояния и т. д. (разумеется, если нет основания изменить их, например при изменении напряжения и т. п.). Важность сохранить прежние общие потери вытекает из того, что обычно приходится пользоваться прежней охлаждающей системой (баком) трансформатора. Если части изоляции (цилиндры, прокладки и т. п.) находятся в порядке и соответствуют новому напряжению, их стараются использовать.

Перерасчет трансформатора сильно затрудняется, если щиток не сохранился, а также если нет возможности определить число витков обмоток, т. е. если дан только сердечник. В этом случае приходится руководствоваться данными справочников и т. д. (см., например, табл. I и II в приложении).

Если неизвестно, из какой стали сделан сердечник, очень полезно произвести опыт холостого хода трансформатора с соблюдением должных предосторожностей. На сердечник надевают такое число витков (обычно из гибкого кабеля), чтобы создать в сердечнике примерно номинальную индукцию при имеющемся в наличии напряжении; конечно, кабель выбирается с расчетом на большой ток холостого хода соответственно малому числу витков.

Если при перерасчете изменяются основные величины трансформатора, как то: частота, мощность, индуктивность и т. д., то расчет соответственно усложняется и проводится по указаниям соответствующих параграфов этой книги.

Следующие общие соображения следует иметь в виду при всех перерасчетах, в особенности старых трансформаторов.

1. Изоляция сердечника от времени портится, сердечник ржавеет, потери в нем возрастают; поэтому новое значение индукции надо выбирать меньше прежнего.

2. Изоляция проводов портится (сохнет), новая изоляция, изготовленная по новым повышенным нормам, требует больше места. В результате этих причин мощность трансформатора приходится снижать. Величина испытательного напряжения для перемотанного трансформатора выбирается в зависимости от состояния применяемой изоляции в пределах $1,5 \div 1,75$ от номинального. Разумеется, если обмотки и вся изоляция ставятся новые, то нет основания снижать испытательное напряжение против норм (§ 56).

ЭЛЕМЕНТЫ ДЕТАЛЬНЫХ РАСЧЕТОВ ТРАНСФОРМАТОРОВ

ГЛАВА VI

РАСЧЕТ И КОНСТРУКЦИЯ СЕРДЕЧНИКОВ

§ 24. Основные требования, которым должен удовлетворять сердечник

1. Конструкция сердечника должна быть возможно простой как сама по себе, так и в отношении сборки.

2. Число отверстий для стяжных шпилек должно быть минимальным, так как всякое отверстие: 1) отнимает часть активного сечения, причем повышается индукция и растут потери и нагревание сердечника, 2) шпильки, даже при хорошей изоляции их, могут дать замыкание на листы сердечника и вызывать „пожар“ сердечника (см. ниже). В новейших конструкциях стараются обойтись минимумом отверстий в сердечнике и по возможности не ставить шпилек на пути главного магнитного потока.

3. Сердечник должен быть механически достаточно прочен, так как, во-первых, часто за верхнее ярмо производится подъем всей выемной части трансформатора, а, во-вторых, на сердечник передаются все усилия, действующие на обмотки при коротких замыканиях. Сердечник должен быть скреплен достаточно сильно во избежание гудения трансформатора.

4. Сердечник должен достаточно охлаждаться.

5. При проектировании сердечника следует точно учесть все производственные условия, как то: наличие ножниц для резки листов требуемого размера, наличие штампов, прессов, пуансонов для отверстий; нужно соблюдать и принятый шаг отверстий в листах (если отверстия необходимы).

§ 25. Материал сердечника

Материалом для сердечника служит сплав слабоуглеродистой стали с кремнием, именуемый, согласно ОСТ 6391, „электротехнической листовой сталью“. Сорт и свойства ее определяются в основном процентным содержанием кремния. При содержании кремния в 4% материал называют также высоколегированным, а применяемый иногда (§ 26) материал с 1% кремния — слаболегированным. Ниже приводятся выдержки из ОСТ 6391.

1—2. Сорт стали характеризуется ее маркой, толщиной и размерами листов. Марки — см. табл. 3 и 4. Размеры листов 2000×1000 mm и 1500×750 mm,

толщина 0,5 и 0,35 mm (табл. 4); сорта (первый или второй) различаются по наружному виду.

3. От величин, указанных в п. 1—2, допускаются следующие отклонения: в длине и ширине отдельных листов $+ 2\%$, в толщине отдельных листов $\pm 10\%$.

4. Листы электротехнической стали должны быть гладкими наощупь, без ржавчины, без отстающих пленки и окачины, а также без других, связанных с горячей прокаткой стали, недостатков, могущих оказать вредное влияние на механические и магнитные свойства стали.

Листы электротехнической стали марок ЕС4А, ЕС4АА и ЕС4 должны быть подвергнуты декапировке, т. е. протравлению в соответствующих растворах кислот для удаления пленки окислов.

5. Разница между наибольшей и наименьшей толщиной (в разных местах) одного и того же листа не должна превосходить 15% от средней толщины данного листа.

7. Магнитная индукция листовой электротехнической стали для определенных значений намагничивающих ампервитков на 1 см должна быть не менее указанной в табл. 3.

От указанных в этой таблице значений магнитной индукции допускаются отклонения в сторону уменьшения не более чем на 50 Gs.

8. Потери энергии в листовой электротехнической стали на гистерезис и токи Фуко, измеренные при максимальной индукции $B = 10\,000$ Gs и $B = 15\,000$ Gs при частоте тока 50 Hz и при синусоидальной форме кривой приложенного напряжения, не должны превосходить величин, указанных в табл. 4 в ваттах на килограмм.

Таблица 3

Марки стали	Магнитная индукция в гауссах при ампервитках на 1 см			
	25	50	100	300
ЕС1А	15 100	16 400	17 700	19 900
ЕС3А	14 500	15 600	16 700	18 900
ЕС4АА и ЕС4А	14 300	15 400	16 500	18 500
ЕС4	14 400	15 500	16 600	18 700

Таблица 4

Марки стали	Толщина листа в миллиметрах			
	0,5		0,35	
	ν_{10}	ν_{15}	ν_{10}	ν_{15}
ЕС1А	3,3	7,9	—	—
ЕС3А	2,3	5,6	2,0	4,2
ЕС4	1,8	3,9	1,45	3,4
ЕС4А	1,8	3,8	1,3	3,3
ЕС4АА	1,6	3,5	—	—

Примечание. Потери энергии на гистерезис и токи Фуко в ваттах на 1 кг стали называются удельными потерями и обозначаются символом ν с индексом 10 и 15: ν_{10} и ν_{15} . При этом ν_{10} обозначает удельные потери при максимальной индукции $B = 10\,000$ Gs, ν_{15} обозначает удельные потери при максимальной индукции $B = 15\,000$ Gs.

9. Увеличение потерь на гистерезис и токи Фуко в листовой электротехнической стали вследствие ее старения допускается:

Для стали марки ЕС1А не более 7,5%	} от соответствующей величины потерь, указанной в п. 8
" " " ЕС3А не более 6,5%	
" " марок ЕС4, ЕС4А и ЕС4АА не более 5%	

14. Удельный вес γ_c электротехнической стали принимается для стали марок:

ЕС1А	ЕС3А	ЕС4	ЕС4А	ЕС4АА
$\gamma_c = 7,8$	7,65	7,6		

З а м е ч а н и я к ОСТ 6391

Чрезвычайно важна однородность листов по толщине. Так как упомянутый ОСТ допускает отступления в толщине отдельных листов в $\pm 10\%$, то при числе листов в пакете порядка 1000 и толщине листов 0,35 mm общее суммарное отступление может составить $0,1 \cdot 0,35 \cdot 1000 = 35$ mm, что, конечно, затрудняет сборку сердечников. Неоднородная толщина не позволяет вложить требуемое количество листов с одновременным соблюдением размеров стержней и ярем по чертежу, в результате чего индукция, ток холостого хода и потери в сердечнике окажутся увеличенными против расчета. Поэтому часто прибегают к добавочной сортировке и калибровке листов по толщине.

Приведенные в ОСТ 6391 величины магнитной индукции B для данного числа ампервитков на 1 см являются наименьшими, допускаемыми ОСТом нормами. Обычно индукция получается больше. Средние кривые намагничивания для электротехнической стали марок ЕС4А и ЕС1А приведены на рис. 129.

Кривые потерь для разных значений магнитной индукции для стали тех же марок см. на рис. 135.

§ 26. Выбор сорта стали и величины магнитной индукции

1. Сталь марки ЕС4А толщиной 0,35 mm применяется для трехфазных трансформаторов по ОСТ 2524 мощностью 5÷180 kVA и для длительно работающих трансформаторов с воздушным охлаждением.

2. Сталь марки ЕС4АА толщиной 0,5 mm применяется: а) для всех трансформаторов по ОСТ 2524, начиная с мощности 320 kVA и выше, б) для трансформаторов напряжения и с) для трансформаторов металлических ртутных выпрямителей.

3. Сталь марки ЕС4 рекомендуется применять для трансформаторов звонковых, слабotoчных, котельных и сварочных.

4. Сталь марки ЕС4А толщиной 0,5 mm применяется для всех прочих трансформаторов, кроме указанных в п. 1, 2, 3 и 7.

5. Величина индукции B выбирается в зависимости от типа, мощности и назначения трансформатора, системы охлаждения и сорта применяемой трансформаторной стали.

Чем больше мощность трансформатора, чем более интенсивным должно быть охлаждение и чем лучше сорт стали, тем

больше можно выбирать величину B . Для стали марок ЕС4А и ЕС4АА при частоте 50 Hz можно выбирать величину B по табл. 5.

Т а б л и ц а 5

	B (гаусс)
Нормальные трансформаторы с естественным масляным охлаждением до 100 kVA	11000 ÷ 13000
То же, средние и мощные	13000 ÷ 14500
Трансформаторы с воздушным охлаждением	9000 ÷ 12000
" с весьма малой средней годовой нагрузкой	9500 ÷ 11000

Для нормальных трансформаторов с масляным охлаждением, мощностью 5 ÷ 500 kVA, при частоте 50 Hz можно руководствоваться также кривой рис. 31 [Л. 21, стр. 180].

Индукцию в ярме B_y у стержневых трансформаторов обычно берут несколько (на 5 ÷ 30%) меньшей, чем в стержнях (§ 30). Для предварительного расчета можно считать $B_y = B$ или же особо учитывать усиление ярма (см. формуляр, § 109).

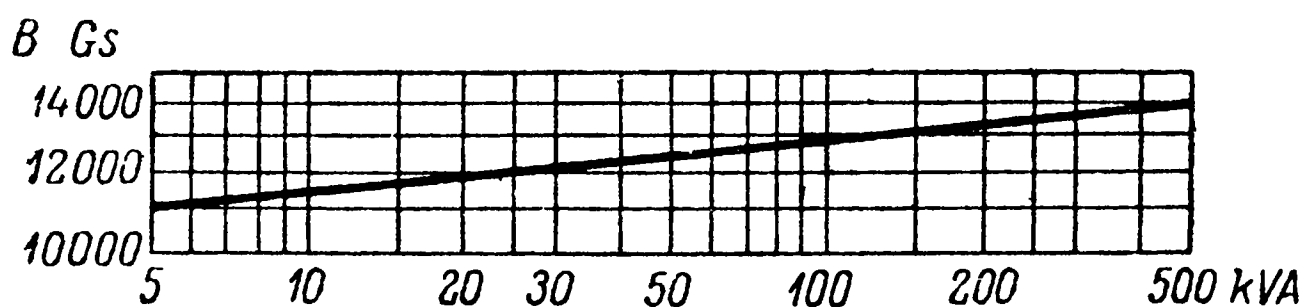


Рис. 31. Величина магнитной индукции в нормальных германских трехфазных трансформаторах.

Вообще говоря, чем выше выбираемое значение B , тем меньше по размерам и тем легче получается сердечник, представляющий наиболее тяжелую часть трансформатора. Однако увеличение B ограничивается: а) ростом потерь в сердечнике (§ 68) и нагреванием его (§ 86 и 88), б) повышением тока холостого хода (§ 65 — 67), в) ростом высших гармоник кривой тока холостого хода [Л. 4, стр. 30, Л. 146 — 149] и г) увеличением толчков тока при включении трансформаторов с насыщенным железом [Л. 4, стр. 57].

Влияние сорта применяемой стали усматривается из следующего соображения. Если на рис. 32 кривые a и b представляют потери $\nu = f(B)$, то, переходя от сорта стали a к сорту b с меньшими потерями, можно повысить индукцию с B_a до B_b при прежних общих потерях в сердечнике, если, конечно, ток холостого хода и его гармоники не будут препятствовать такому повышению индукции.

6. Существенно отметить преимущества применения стали толщиной 0,5 mm для мощных трансформаторов, если мириться с повышением удельных потерь примерно на $15 \div 20\%$. Преимущества эти следующие.

а. Коэффициент заполнения k_c (§ 27) повышается примерно в отношении $0,88 : 0,84$, т. е. на $4,5\%$; на столько же процентов можно понизить число витков обмоток и тем сэкономить на расходе меди. Индуктивность трансформатора снизится в $1,045^2 = 1,095$ раз, т. е. на $9,5\%$.

Или же, оставляя прежнюю величину индуктивности, можно на те же $9,5\%$ снизить высоту обмоток L , что весьма существенно для мощных трансформаторов по габаритным соображениям.

б. Стоимость стали толщиной 0,5 mm значительно ниже, чем стали толщиной 0,35 mm; благодаря экономии на стоимости сердечника, можно увеличить сечение обмоток для снижения потерь P_m и компенсации тем самым повышения потерь P_c . В результате все же будет экономия, и получится трансформатор со свойствами, отмеченными в п. а.

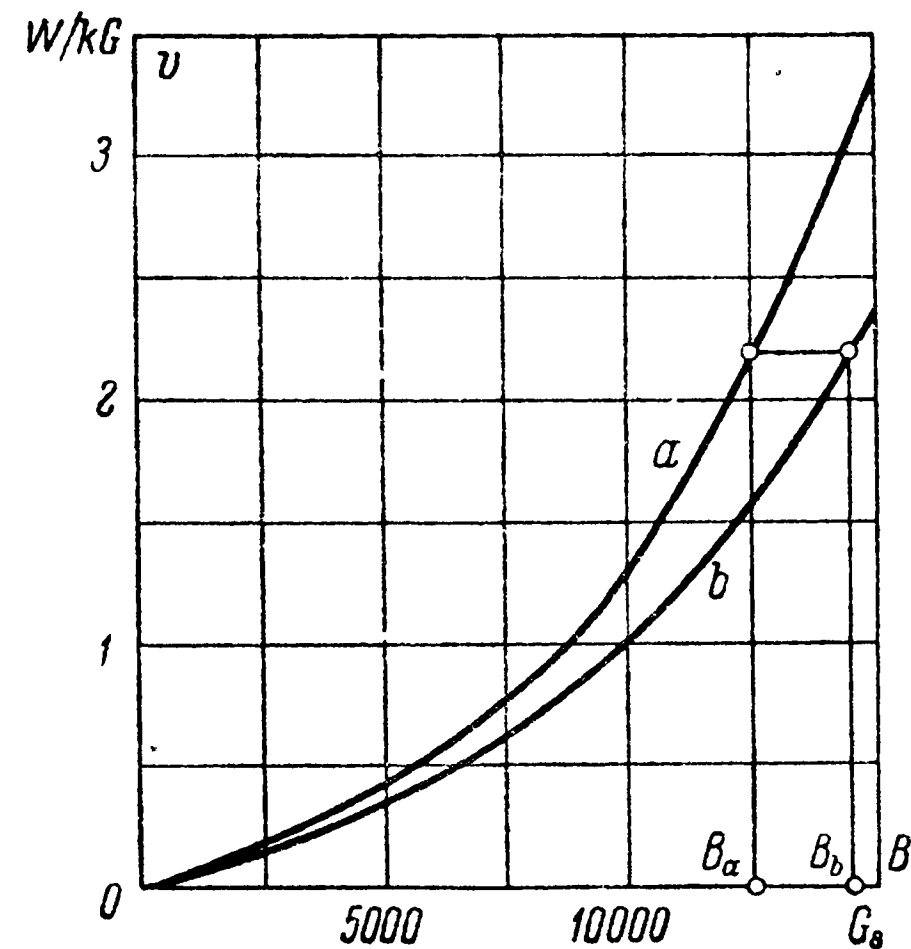


Рис. 32. Кривые для выбора индукции при разных сортах стали.

с. Число листов, подлежащих сборке, будет на 30% меньше, что упрощает заготовку листов и облегчает сборку.

д. Механически сердечник получается гораздо более жестким, что существенно для больших и тяжелых сердечников, в особенности при сборке впритык.

Конечно, не следует забывать, что потери в стали P_c все же получаются на $15 \div 20\%$ больше; это может быть и недопустимым, ибо величина P_c часто бывает заданной.

7. Что касается специальных трансформаторов, то для них сорт стали и величину индукции B выбирают, исходя из следующих соображений. Для кратковременно работающих трансформаторов сварочных аппаратов и т. д. ($ПКР = 10 \div 15\%$) потери в сердечнике роли не играют; в целях же снижения намагничивающего тока применяют сталь марки ЕС1А, а индукцию B берут до $15\,000 \div 16\,000$ Gs на наивысшей ступени регулировки. При низких частотах (15 и $16\frac{2}{3}$ Hz) можно брать сталь марки ЕС3А, а индукцию выбирать по расчету нагревания сердечника.

При повышенных частотах ($500 \div 2000$ Hz) приходится снижать индукцию до $2000 \div 4000$ Gs и применять наилучшую трансформаторную сталь. При частотах до $10\,000$ Hz и более при-

меняют специальную трансформаторную сталь толщиной 0,1 и даже 0,05 mm.

§ 27. Изоляция сердечника

Изоляция листов. Для изоляции листов применяются два способа: 1) наклеивание на листы тонкой (0,03 mm толщиной) бумаги клеем или специальным клеем¹ или 2) покрытие листов лаком на специальной машине с последующим запеканием этого лака — „эмалирование“; толщина получающейся пленки около 0,01 mm (см. еще § 4).

Хотя последний способ требует специального оборудования — лакировальной машины, для установки которой нужно много места, однако он имеет следующие преимущества: 1) меньшая возможность замыкания между листами, 2) большая теплостойкость изоляции листов, 3) меньшее воздействие сырости на листы, 4) большее значение коэффициента k_c заполнения геометрического сечения сердечника.

Коэффициент k_c показывает, какую часть геометрического сечения S' составляет активное сечение S :

$$k_c = \frac{S}{S'}. \quad (41)$$

Этим коэффициентом учитывается наличие изоляции между листами и невозможность спрессовать сердечник, состоящий из отдельных листов, до теоретического размера общей их толщины вместе с изоляцией. При сборке внахлестку коэффициент k_c можно брать из табл. 6.

Таблица 6

Толщина листов стали в mm	Род изоляции листов	
	бумага (толщина 0,03 mm)	лак (толщина 0,01 mm)
0,35	$k_c = 0,85$	$k_c = 0,90$
0,5	$k_c = 0,88$	$k_c = 0,92$

При сборке впритык (§ 28) этот коэффициент больше примерно на 1÷2% из-за большей прессовки. Зависимость k_c от степени прессовки показана на рис. 33 для трансформаторной стали толщиной 0,35 и 0,5 mm при бумажной изоляции листов [Л. 81].

Изоляция пакетов. Не считая изоляцию листов достаточно надежной защитой всего активного сечения от возникновения местных токов Фуко и местных нагревов, часто применяют добавочную изоляцию между отдельными пакетами, на которые разделяют все активное сечение; в этом случае через каждые 50÷100 mm прокладывают лист пресшпана или лентероида толщиной 1÷2 mm (при сборке впритык не следует забывать,

¹ Некоторые фирмы прокладывают бумагу при сборке сердечников, что лучше гарантирует против возможного замыкания между листами, но сложно в производстве.

что каждый из таких пакетов должен быть заземлен, т. е. соединен со станиной и баком трансформатора). В некоторых конструкциях для повышения теплостойкости изоляции пакетов

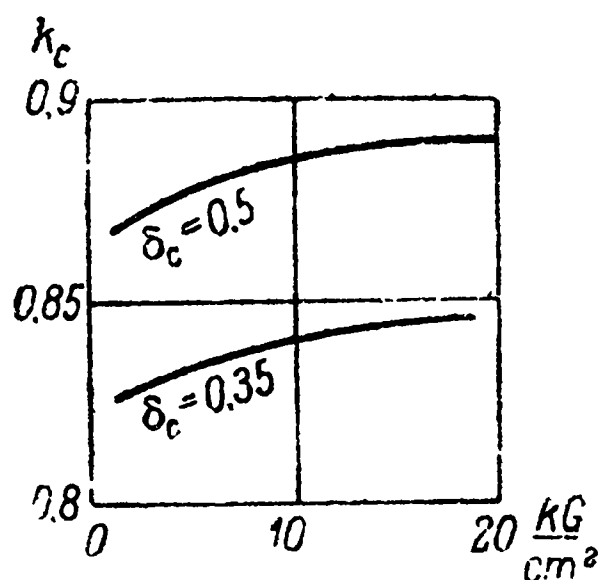


Рис. 33. Значение коэффициента k_c при изменении сжатия пакета сердечника и бумажной изоляции листов.

ее изготавливают из бакелизованного асбеста. В других конструкциях охлаждающие сердечник каналы служат одновременно и для изоляции пакетов. В этом случае они не заключают в себе ничего металлического, но лишь деревянные рейки толщиной 10÷12 мм (рис. 154), образующие каналы. Придавая особое значение изоляции листов вокруг стяжных шпилек, фирма ASEA применяет иногда поочередно нормальные и увеличенные отверстия для шпилек (см. рис. 34; сборка — по нескольку листов); этим улучшается изоляция всего сердечника.

§ 28. Способы сборки сердечников

Для сборки из листов сердечников трансформаторов применяются два способа. Более старым способом, почти вышедшим из употребления, является сборка впритык; более новым, почти везде применяемым — сборка внахлестку.

По первому способу сердечник составляется из частей (стержни, ярма), собираемых в отдельности из листов с применением спрессовки и креплением сильными тягами. На рис. 35 изображен сердечник трехфазного стержневого трансформатора со сборкой впритык. Во избежание взаимного замыкания листов в стыках (зазорах) прокладывают изолирующие теплостойкие прокладки, в трансформаторах с масляным охлаждением — маслоупорный миканит. Преимуществом такой конструкции является простота разборки и сборки всей активной части при осмотрах и ремонтах обмотки и сердечника, в то время как у трансформаторов со сборкой сердечника внахлестку приходится для снятия обмоток разобрать по листу у стержневых — верхнее ярмо, а у броневых — весь сердечник. Особенно неприятна разборка и обратная сборка верхнего ярма мощных стержневых трансформаторов при ширине листов ярма до 500 мм и больше; при этом обдирается изоляция листов, если она состоит из наклеенной бумаги.

Однако указанному единственному преимуществу сборки впритык можно противопоставить целый ряд недостатков, из которых существенны следующие.

1. Для точной сборки всего сердечника поверхности стыков, прочерченные жирно на рис. 35, должны быть возможно глад-

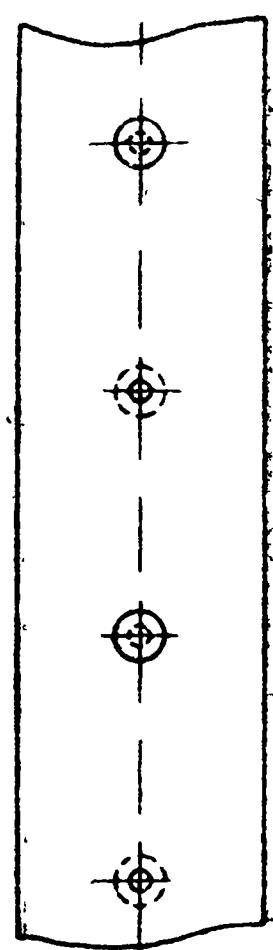


Рис. 34. Конструкция ASEA для предупреждения замыкания в листах вокруг стяжных шпилек.

кими и плоскими. Если на них будут выступы хотя бы в $0,1 \div 0,2$ мм, то трансформатор будет сильно гудеть, и его придется разбирать вновь. При невозможности точной резки и сборки листов прибегают к обработке — чаще всего строганию — поверхностей, отмеченных на рис. 35, что однако тоже нежелательно, так как при этом остаются заусенцы, которые нельзя снять, разобрав сердечник, ибо затем его нельзя будет точно собрать вновь.

2. Для спрессовки сердечников при их сборке требуются мощные гидравлические пресса, а для точной сборки — специальные, например электромагнитные, сборочные приспособления.

3. Общий коэффициент заполнения сечения сердечника при сборке впритык получается ниже, так как хотя k_c (§ 27) и увеличивается на $1 \div 2\%$, но k_ϕ снижается примерно на 10% (§ 29).

4. Сборка впритык требует сложных и массивных креплений сердечника (планки, шпильки, рама и т. п.), чем усложняется конструкция всего трансформатора; ослабление этих креплений от гудения трансформатора и тепловых расширений ведет к полному расстройству всего трансформатора.

5. Сильно затрудняется заземление сердечника, так как отдельные его части (стержни, ярма), равно как и прессующие их накладки,¹ должны быть взаимно изолированы прокладками (см. выше) и в то же время должны быть все заземлены. Если происходит пробой с одной из обмоток на ближайшую часть сердечника, например на стержень, то обычно через стыки проходят пробой и на ярмо, хотя стержень сам и заземлен. Часть поверхности стыков при этом замыкается, и развивается „пожар сердечника“ (см. ниже).

Вследствие указанных недостатков конструкция сердечников со сборкой впритык в настоящее время почти оставлена, и применяется более совершенная конструкция со сборкой внахлестку — по $2 \div 3$ листа (рис. 223), из преимуществ которой можно назвать следующие.

1. Меньше зазоры δ в стыках, благодаря чему ток холостого хода получается меньшим; меньше также потери и нагрев в сты-

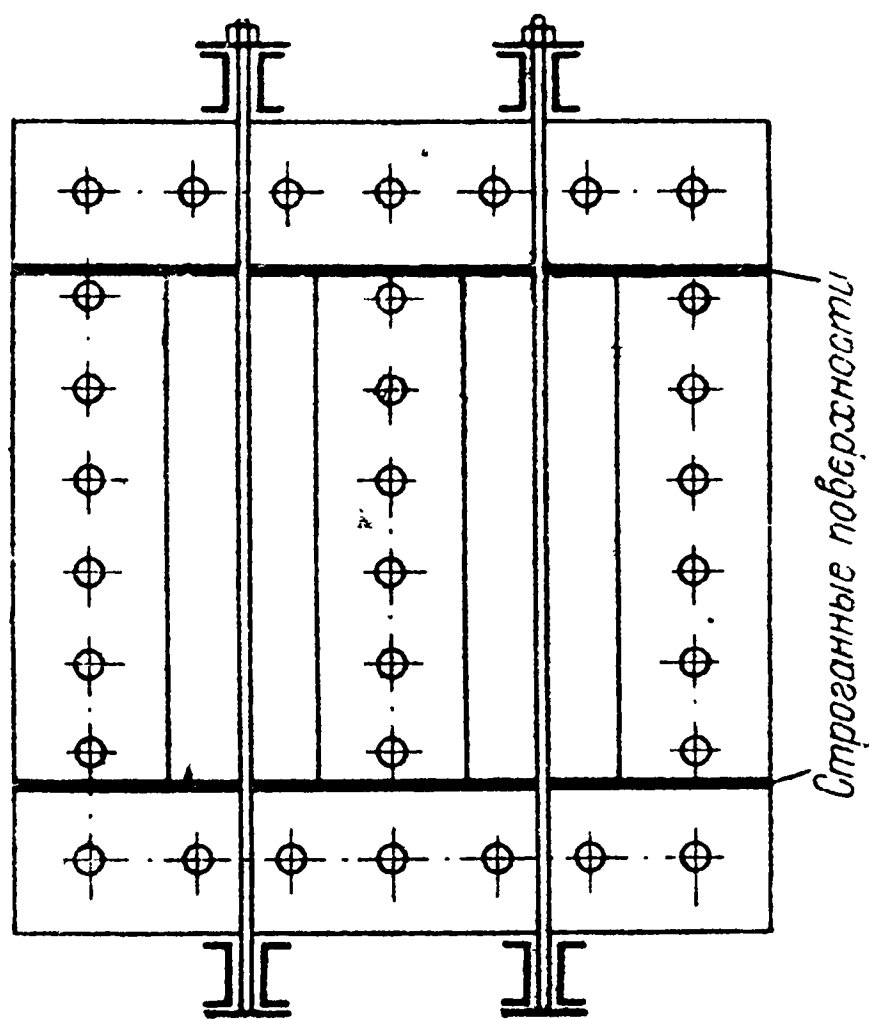


Рис. 35. Сборка трехфазного сердечника впритык.

¹ Накладки — во избежание статического заряда их при испытании изоляции ближайшей к сердечнику обмотки высоким напряжением.

ках, так как нет утечки в стыках магнитного потока в стороны, например через прессующие накладки (§ 69).

2. Гораздо меньше вероятность расстройств сердечника при работе трансформатора.

3. Конструкция всего сердечника упрощается и облегчается.

4. Коэффициент заполнения $k_{\varnothing}$ получается больше.

5. Получается возможность иногда вовсе не применять шпилек (§ 29), проходящих сквозь сердечник, или же обойтись минимальным количеством их. Следует иметь в виду, что всякое отверстие в активной стали при плохо снятых заусенцах, при порче изоляции болта и т. п. может явиться причиной полной порчи трансформатора от короткого замыкания не обмотки, а сердечника. Действительно, витковое напряжение e_w современных мощных трансформаторов достигает 100 V и более (§ 37); поэтому всякое замыкание в контуре, заключающем даже небольшую часть главного магнитного потока, влечет за собой нагрев и даже расплавление значительного количества активной стали — *пожар сердечника*. Трансформатор тогда выбывает из строя на долгое время, и ремонт его (капитальный, ибо он связан с заменой части листов сердечника) возможен лишь на трансформаторном заводе. Поэтому короткое замыкание в сердечнике опаснее, чем в обмотке, так как в последнем случае ремонт проще и сводится лишь к замене обмотки и изоляции.

§ 29. Расчет сердечников стержневых трансформаторов

Наиболее распространенной является конструкция сердечника с вертикальными стержнями и горизонтальными ярами (см., например, чертежи I, II и III в приложении).

Гораздо реже, например у трансформаторов с воздушным охлаждением, при чередующихся обмотках и т. п., встречается горизонтальное расположение стержней; оба яра становятся тогда вертикальными, а конструкция рамы (станины) соответственно изменяется.

Так как круглая форма катушек обмотки имеет ряд преимуществ (§ 39), то сечение стержней выбирается ступенчатым, вписывающимся в круг; квадрат является в этом смысле частным случаем ступенчатого сечения с числом ступеней, равным 1. Относительно числа ступеней можно отметить следующее. При заданном диаметре d круга, описанного около стержня, геометрическое сечение S' стержня увеличивается с увеличением числа ступеней, так как растет коэффициент заполнения $k_{\varnothing}$, причем:

$$k_{\varnothing} = \frac{S'}{\frac{\pi d^2}{4}}. \quad (42)$$

Следовательно, при этом увеличивается и магнитный поток Φ , а с ним и мощность трансформатора P при том же числе витков (и ампервитков) обмоток, ибо $P \equiv Aw \cdot \Phi$ (§ 9).

Таблица 7

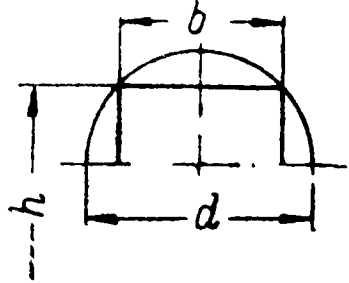
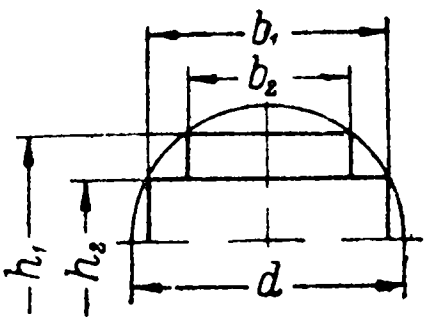
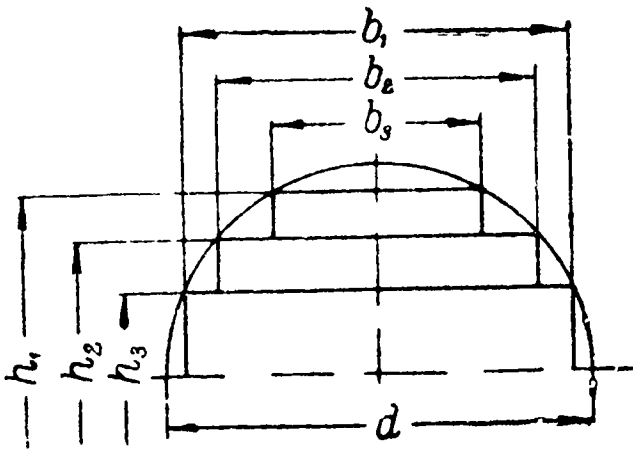
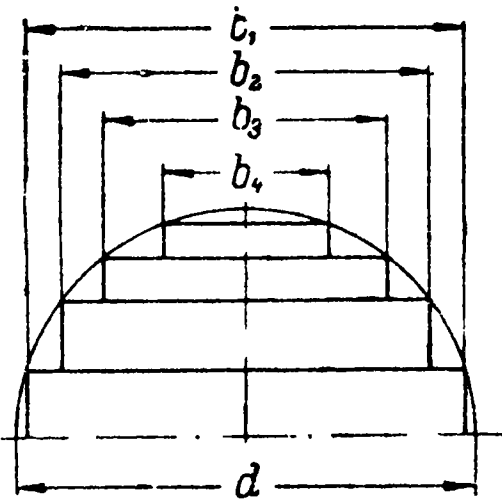
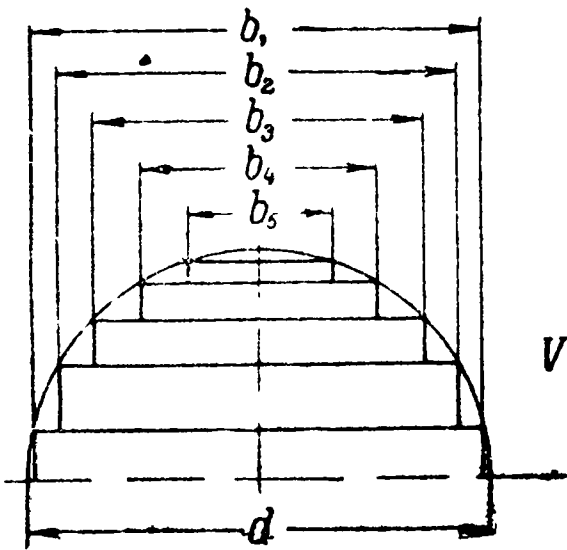
Число ступеней n	Форма сечения ступеней	Значение коэффициента $k_{\varnothing}$ при отсутствии охлаждающих каналов	Ширина листов в частях диаметра описанного круга
1	 I	0,637	$b = 0,707d$
2	 II	0,787	$b_1 = 0,851d$ $b_2 = 0,526d$
3	 III	(0,851)	$b_1 = 0,906d$ $b_2 = 0,707d$ $b_3 = 0,424d$
4	 IV	(0,886)	$b_1 = 0,933d$ $b_2 = 0,795d$ $b_3 = 0,606d$ $b_4 = 0,359d$
5	 V	(0,901)	$b_1 = 0,956d$ $b_2 = 0,846d$ $b_3 = 0,707d$ $b_4 = 0,534d$ $b_5 = 0,314d$

Рис. 36.

Для каждого числа n ступеней нетрудно найти наивыгоднейшие значения ширины $b_1, b_2, \dots$ листов для получения наибольшего коэффициента $k_\emptyset$.

На табл. 7 изображены сечения стержня и приведены как значение коэффициента $k_\emptyset$, так и наивыгоднейшие значения ширины листов для употребительного числа n ступеней (в частях диаметра d описанного круга).

Для предварительных расчетов значения коэффициента $k_\emptyset$ можно брать из табл. 8.

Таблица 8

	Число ступеней n	$k_\emptyset$	Примечание
Малые трансформаторы	$2 \div 3$	$0,78 \div 0,84$	Без каналов
Средние "	$4 \div 6$	$0,83 \div 0,88$	"
Большие "	$7 \div 10$	$0,8 \div 0,83$	С каналами

Выбор большого числа ступеней сулит значительные выгоды. Из табл. 7 видно, что если вместо двух ступеней взять пять, то можно повысить коэффициент заполнения $k_\emptyset$ в:

$$\frac{0,901}{0,787} = 1,15 \text{ раз,}$$

т. е. на 15% теоретически. Если эту цифру даже уменьшить (см. ниже) до 12%, то и тогда, при том же диаметре d стержня и той же индукции B , можно сократить на 12% числа витков обмоток и сэкономить столько же на весе меди. Если при этом оставить прежние потери в меди, то можно будет уменьшить еще на 12% сечение и вес меди. Но меньшее количество меди потребует и меньшего окна трансформатора, благодаря чему сократятся примерно на те же 12% как вес сердечника, так и потери в нем. В результате будет сэкономлено 12% веса сердечника и 24% веса меди при небольшом повышении к. п. д. трансформатора. Однако нужно помнить, что при сборке внахлестку для каждой ступени потребуется для однофазного трансформатора — две (рис. 223), а для трехфазного — три различных формы листов (рис. 210). Поэтому большое число ступеней выбирают преимущественно при больших диаметрах d стержня.

Выбор числа ступеней, а также точных размеров (рис. 36) ширины $b_1, b_2, \dots$ листов и толщины $h_1, h_2, \dots$ пакетов ведется параллельно с конструированием всего сердечника.¹ Размеры $b_1, b_2, \dots$ (в мм) выбираются обычно четными, для того

¹ При наличии канала, перпендикулярного листам (чертеж III в приложении), ширину отдельных листов следует считать равной $\frac{b}{2}$; о числе каналов см. § 85.

чтобы половины их были целыми числами: это существенно при разметке отверстий для стяжных шпилек.

При прямоугольной форме сечения стержня наивыгоднейшим отношением размеров h и b является $h/b = 2 \div 2,5$.

Действительно, обозначим у трансформатора мощностью P через C_1 — стоимость сердечника вместе с прямолинейной частью h катушек обмоток (рис. 6), а через C_2 — стоимость закругленной части l_3 катушек. Если теперь увеличить высоту h пакета сердечника в x раз, то стоимость такого измененного трансформатора составит $xC_1 + C_2 = C$. Для того чтобы вернуться к мощности P , нужно, согласно теории соразмерности, уменьшить все размеры трансформатора в $x^{\frac{1}{4}}$ раз, вследствие чего вес и цена уменьшатся в $x^{\frac{3}{4}}$ раз.

Таким образом, надо стремиться к минимуму выражения:

$$\frac{xC_1 + C_2}{x^{\frac{3}{4}}},$$

что приводит к:

$$xC_1 = 3C_2 \quad \text{или} \quad C_2 = \frac{C}{4}.$$

Но, поскольку стоимость сердечника и стоимость обмотки должны составлять по $\frac{C}{2}$ (§ 10), то должно быть $l_3 = h$, что осуществимо только при $h/b = 2 \div 2,5$.

При этом сечение ярма получает тоже прямоугольную форму, а ширина листов ярма b_y будет меньше, чем при ступенчатой форме сечения стержней. Весь сердечник получается компактнее и легче: однако, вследствие недостатков прямоугольных катушек (§ 39), сердечники такой формы применяют лишь для мелких трансформаторов.¹

На рис. 37 изображены некоторые характерные конструкции стержня при круглых обмотках.

Для скрепления сердечников служат накладки и стальные шпильки (рис. 37а) с гайками и шайбами на концах, реже — для малых трансформаторов — заклепки (рис. 37б). Желая вовсе избежать шпилек, проходящих сквозь главный магнитный поток, для мелких и даже средних трансформаторов, мощностью до 1000 kVA, прибегают к конструкции по рис. 37с, причем сердечник сжимается внутренней обмоткой путем забивания клиньев K . Следует избегать применения двух рядов шпилек, так как при соединении их с сердечником может получиться коротко-замкнутый виток. Лишь в двойных сердечниках (чертеж III в приложении) приходится прибегать к двум рядам шпилек, соединяемых общими накладками, но тогда принимают меры к усилению изоляции накладок от сердечника и шпилек от накладок; там, где можно, следует применять шахматное расположение шпилек с отдельными накладками под каждой шпилькой (рис. 38). В зависимости от размеров сердечника шпильки ставятся на взаимном расстоянии 80 ÷ 130 mm. Шпильки рассчитываются на

¹ Некоторым преимуществом таких сердечников является легкая возможность варьировать мощность трансформатора, применяя тот же раскрой листов, но увеличивая число их, а значит и размер h сердечника.

сжатие пакета листов усилием до 3 kG/cm^2 при сборке внахлестку и до $4 \div 5 \text{ kG/cm}^2$ при сборке впритык. Чрезмерным сжатием можно испортить бумажную изоляцию листов. Напряжение материала шпилек берут до 1000 kG/cm^2 .

Шпильки надежно изолируются трубками из бакелизованной бумаги; у больших трансформаторов изоляция шпилек испыты-

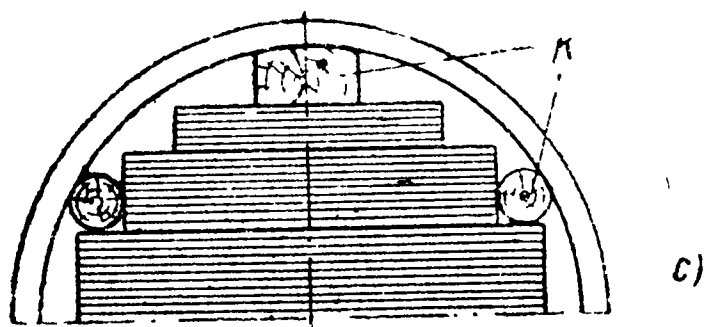
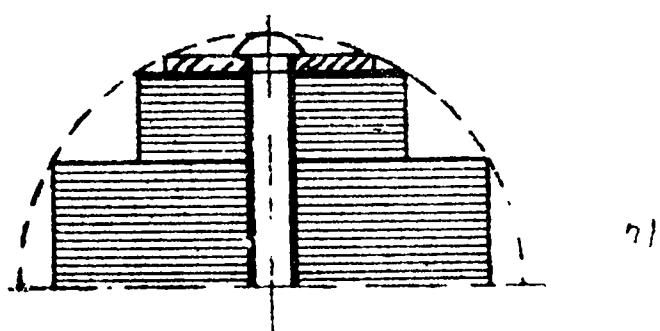
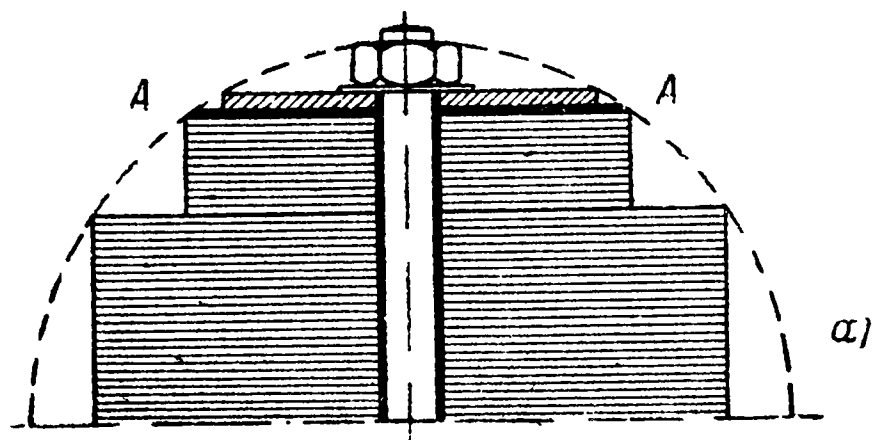


Рис. 37. Крепление стержня при круглых обмотках: *a* — шпильками с гайками; *b* — заклепками; *c* — клиньями *K*.

вается напряжением в $1 \div 2 \text{ kV}$. Отверстия для шпилек должны быть выбраны с достаточным запасом, например: шпилька $1\frac{1}{2}''$, трубка $13/17 \text{ mm}$, отверстие 18 mm , штифты для сборки $17,5 \text{ mm}$. Длина шпилек берется с запасом, так как несжатый пакет имеет толщину, большую нормальной; после сборки излишняя длина шпилек отрезается.

Следует учитывать, что в случае применения прессующих накладок и шпилек значения коэффициента k_ϕ , указанные в табл. 7, являются реальными лишь при числе ступеней $n = 1$ и 2 , так как при большем числе ступеней невозможно разместить прессующие накладки с их изоляцией, шайбы и гайки шпилек и т. д. в пределах сегментов *A — A* (рис. 37*a*). При большом числе ступеней сечения сердечника у малых трансформаторов крепление сердечника клиньями, т. е. практически обмоткой низшего напряжения, представляет хорошее решение, но для мощных трансформаторов невозможно отказаться от шпилек и приходится уменьшать общую толщину h пакета листов, а значит поступать частью полезного сечения. Другой причиной уменьшения полезного сечения является разбухание краев пакета листов, в особенности при одном ряде шпилек. Учет этого явления см. [Л. 28, стр. 23]. Вследствие этих причин приведенные в табл. 7 величины k_ϕ для большого числа ступеней являются теоретическими, почему и заключены в скобки. Данные табл. 8 представляют практические значения коэффициента k_ϕ с учетом крепления стержней шпильками и наличия охлаждающих каналов при $d > 350 \text{ mm}$.

Прочие детали конструкций сердечников при сборке внахлестку см. чертежи в приложении и [Л. 24 и 28]. Механиче-

ский расчет сердечников см. § 107 и [Л. 28]. Об охлаждении сердечников см. § 86 и 88.

При окончательном детальном расчете трансформатора, когда диаметр d стержня уже намечен, следует вычертить на миллиметровой бумаге в масштабе 1:1 или 1:2,5 половину сечений сердечника и ярма с учетом всех конструктивных подробностей (креплений, изоляции, каналов и пр.) и определить сначала геометрические сечения сердечника S' и ярма $S'_я$, а затем при помощи коэффициента k_c (формула 41) и активные сечения $S = k_c \cdot S'$ и $S_я = k_c \cdot S'_я$.

§ 30. Величина и форма сечения ярма стержневых трансформаторов

Казалось бы, в вопросе об усилении ярма не может быть двух мнений. Действительно, является вполне естественным стремление, во-первых, к уменьшению сечения стержней для сокращения длины витков обмоток и достижения тем самым экономии меди и, во-вторых, — к увеличению сечения прочей части магнитной цепи — ярма — для уменьшения тока холостого хода. Обе эти тенденции приводят к образному представлению о том, что обмотки, подобно эластичным бандажам, стремятся вытеснить часть активного материала сердечника из стержней в ярма.

Однако вопрос об усилении ярма не так прост. Есть и сторонники и противники усиления ярма. М. Видмар рассмотрел этот вопрос [Л. 82 и 83] во всей полноте и показал, что получается при усилении ярма.

Несомненно, простое увеличение сечения ярма в $k_я$ раз, без одновременного общего изменения всего трансформатора, ведет к значительному снижению тока холостого хода; это хорошо иллюстрируют кривые рис. 39 [Л. 20, стр. 48]. Однако в таком трансформаторе будет нарушено одно из основных экономических соотношений, а именно равенство весов стержней и ярма (§ 10, п. 2). М.

Видмаром показано, что для получения сравнимых между собой вариантов следует обычный трансформатор (с неусиленными ярмами) вообразить подвергнутым следующим видоизменениям: 1) усилению ярма в $k_я$ раз, 2) удлинению стерж-

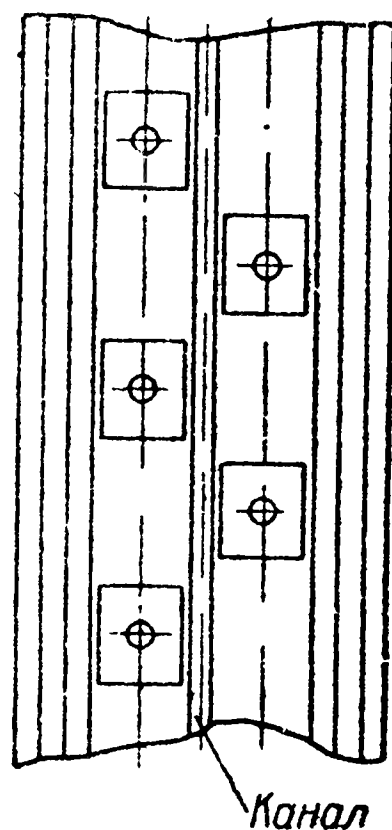


Рис. 38. Крепление двойных сердечников (с каналом).

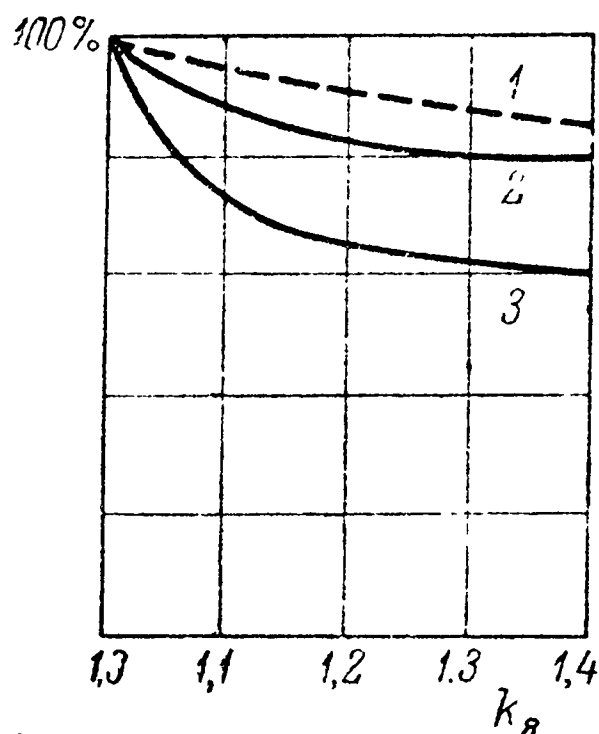


Рис. 39. Снижение потерь P_c (кривая 1) и снижение тока холостого хода (кривая 2 — для $B = 12\,000$ Gs, кривая 3 — для $B = 14\,000$ Gs) при неизменном сечении S стержней и при разных $k_я$.

ней в $k_{я}$ раз, 3) сокращению всех линейных размеров в $k_{я}^{\frac{1}{3}}$ раз и 4) увеличению индукции в $k_{я}^{\frac{1}{3}}$ раз.

Т а б л и ц а 9

Первоначальные размеры и величины	B	e_w	d	S	$S_{я}$	l	a
Новые размеры и величины после усиления ярма по методу М. Видмара	$B \cdot k_{я}^{\frac{1}{3}}$	$e_w \cdot k_{я}^{-\frac{1}{3}}$	$d \cdot k_{я}^{-\frac{1}{3}}$	$S \cdot k_{я}^{-\frac{2}{3}}$	$S_{я} \cdot k_{я}^{\frac{1}{3}}$	$l \cdot k_{я}^{\frac{2}{3}}$	$a \cdot k_{я}^{-\frac{1}{3}}$

В результате получается трансформатор с прежними: мощностью, весами стали и меди и потерями в меди; лишь новые потери в стали P'_c будут иными, а именно:

$$P'_c = P_c \cdot f(k_{я}) = P_c \cdot \frac{k_{я} + \frac{1}{k_{я}}}{2k_{я}^{\frac{1}{3}}}, \quad (43)$$

где P_c — прежнее значение потерь в стали. Минимум $f(k_{я}) = 0,945$ имеет место при $k_{я} = \sqrt{2} = 1,41$.

Таким образом, увеличивая сечение ярма в 1,41 раз с одновременным изменением всего трансформатора указанным образом,

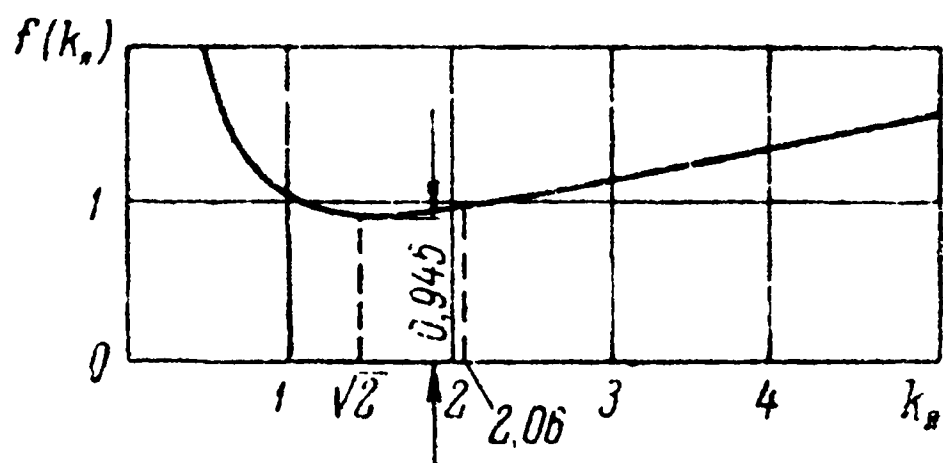


Рис. 40. Значение $f(k_{я})$ по формуле 43.

можно сократить потери в стали на 5,5%. Рис. 40 изображает влияние усиления ярма на потери в стали.

Что касается тока холостого хода, то он может даже возрасти при этом на несколько процентов; минимальным он будет примерно при $k_{я} = \sqrt[5]{1,5} = 1,08$.

Обычно величину $k_{я}$ выбирают в пределах 1,05 ÷ 1,3; однако нужно все время помнить, что речь идет не о простом увеличении сечения ярма в $k_{я}$ раз, но о планомерном изменении всего трансформатора, с тем расчетом, чтобы новая величина сечения ярма оказалась в $k_{я}$ раз больше нового же значения сечения стержня. Поэтому уже при предварительном расчете нужно задаться желаемым значением $k_{я}$ и вводить поправки во все

величины и размеры. При этом для ориентировки может служить табл. 9.

Что касается формы сечения ярма, то простейшей является форма прямоугольника, которая часто и предпочитается. Однако, как известно (§ 69), следует всегда стремиться к возможно равномерному распределению магнитной индукции в сердечнике. Если для однофазного трансформатора рассмотреть сопряжение стержней C с ярмами $Я$ (рис. 41) (безразлично — усиленными или нет), то магнитное сопротивление на пути, включающем пакеты $1_я + 1_с$, будет больше, чем на пути $2_я + 2_с$.¹ В результате этого в стержнях часть магнитного потока будет вытеснена из пакета $2_с$ в пакеты $1_с$ с тем, чтобы в ярмах быть обратно вытесненной из пакетов $1_я$ в пакеты $2_я$. Переход части магнитного потока в направлении, перпендикулярном пакетам, вызывает добавочные потери. Поэтому теперь часто применяют форму сечения ярма по рис. 42 с тем расчетом, чтобы сечения отдельных пакетов ярма были равны (при $k_я = 1$) или пропорциональны (при $k_я > 1$) сечениям соответствующих пакетов стержня. Формы c и d имеют преимущество в большей опорной поверхности для обмоток, а формы a и b предоставляют больше места для вывода концов ближайшей к сердечнику обмотки низшего напряжения, имеющих обычно значительные сечения.

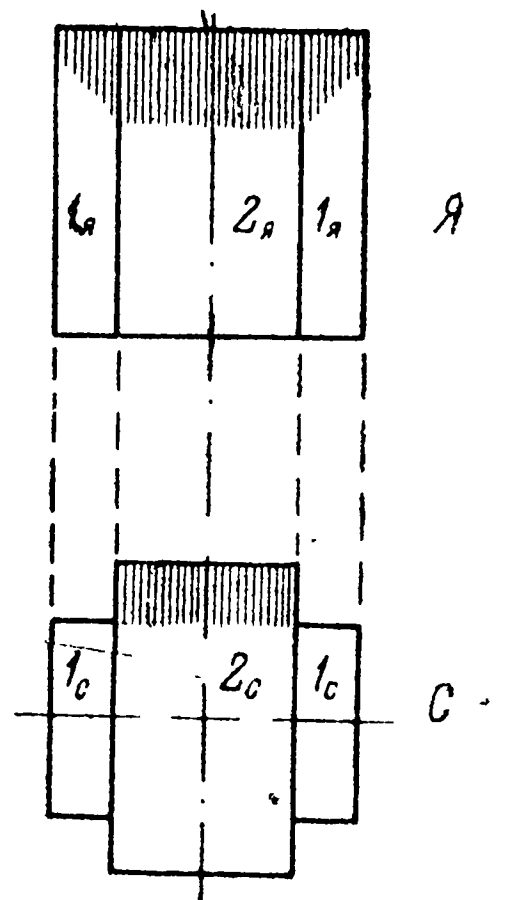


Рис. 41. Сопряжение стержня C с ярмом $Я$.

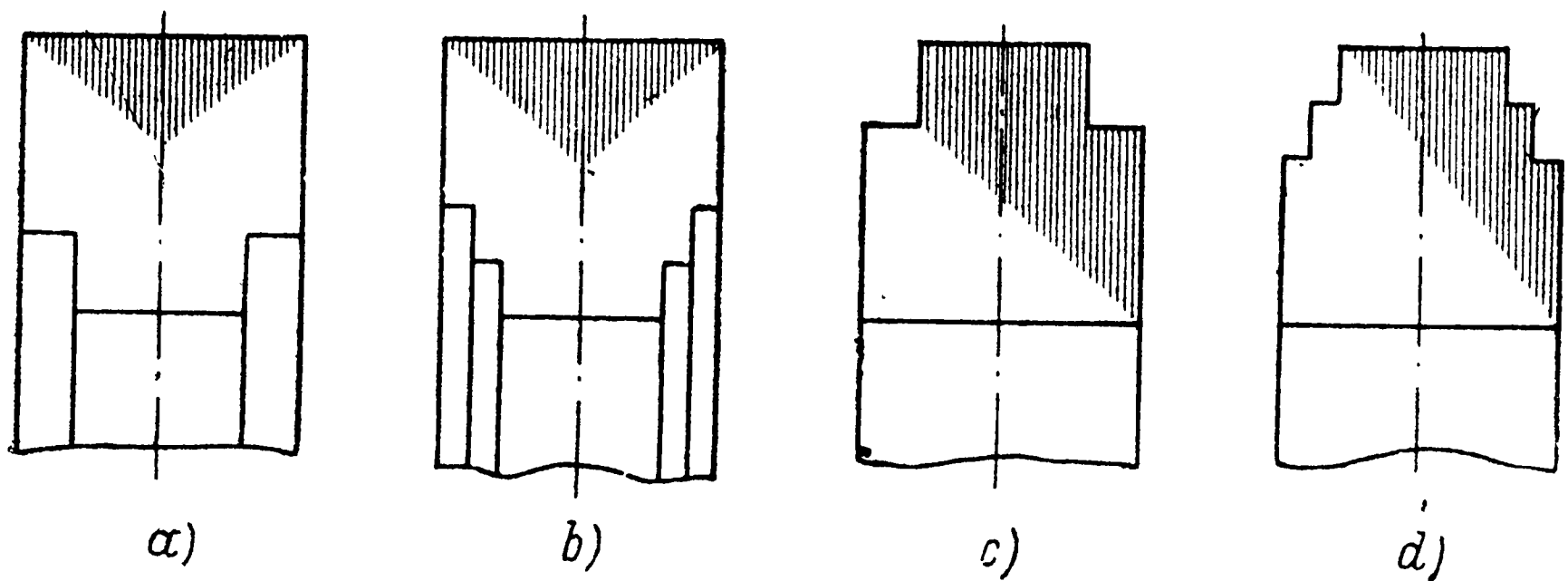


Рис. 42. Различные формы сечения ярма.

При прямоугольной форме сечения ярма ширину $b_я$ листов его вычисляют по формуле:

$$b_я = \frac{k_я \cdot S}{k_с \cdot h} = \frac{S_я}{k_с \cdot h}, \quad (44)$$

где h — толщина общего пакета листов (рис. 36, $Л$). При другой

¹ Если выделить для сравнения пакеты одинакового сечения.

форме сечения размеры $b_{\text{я}}$ определяются путем подбора с соблюдением указанного принципа — примерного равенства сечений соответствующих пакетов ярма и стержня.

§ 31. Расчет сердечников броневых трансформаторов

У броневых трансформаторов сечение сердечника S выбирается значительно бóльшим, чем у стержневых. Это характеризуется увеличением постоянной C в формуле Арнольда (формула 8) до значений: для однофазных трансформаторов $C_1 = 0,8 \div 0,9$, а для трехфазных $C_3 = 0,57 \div 0,6$.

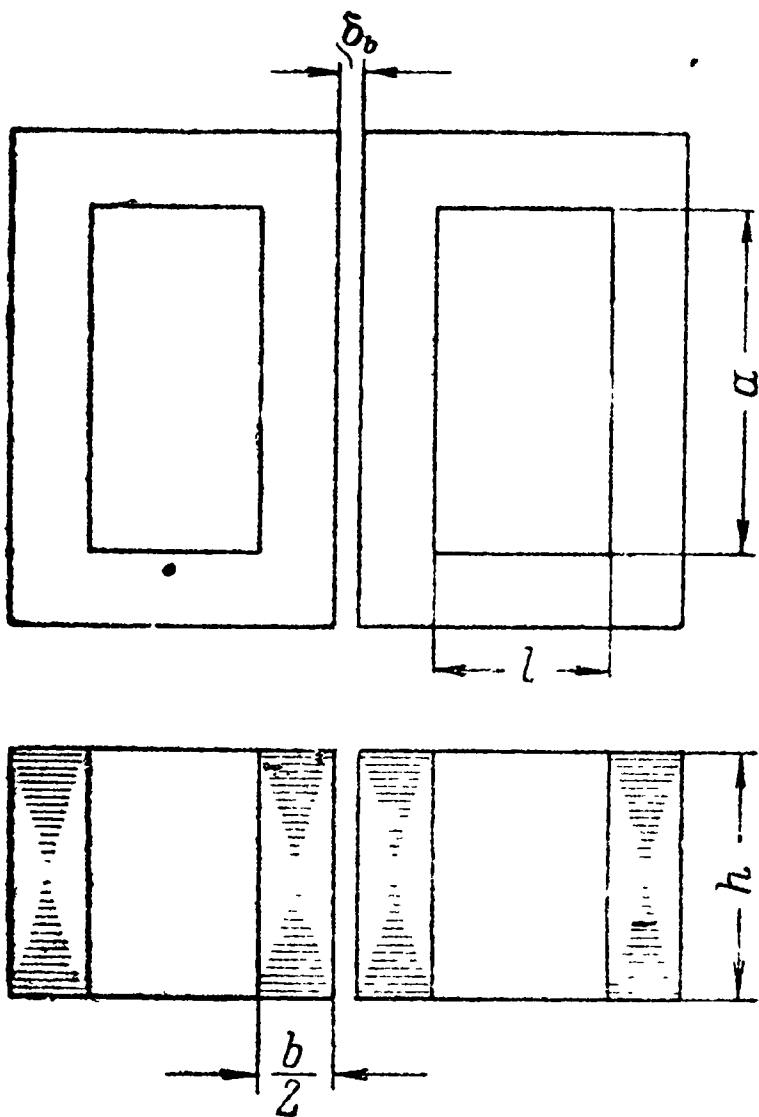


Рис. 43. Сердечник мощного броневоегo трансформатора.

Форма сечения стержня и размеров h/b (рис. 3 и 4) табл. 10 (в зависимости от рабочего напряжения трансформатора).

При сборке таких сердечников внахлестку обычно не применяют шпилек, проходящих сквозь активную сталь, но стягивают сердечник рамами, верхней и нижней, причем стягивающие шпильки проходят снару-
 жу (рис. 44). При сборке впритык пакеты стягивают накладками и шпильками с потайными, конусными гайками (рис. 45), для того чтобы крепления не отнимали ценного места внутри обмоток.

При сборке впритык пакеты стягивают накладками и шпильками с потайными, конусными гайками (рис. 45), для того чтобы крепления не отнимали ценного места внутри обмоток.

¹ Исключение составляет тип сердечника по рис. 5 с круглыми катушками обмоток.

Общий вид магнитной цепи броневоегo типа приведен на рис. 3 и 4; иногда — преимущественно для мощных трансформаторов — стараются применять для стержня и ярма листы одинаковой ширины, и магнитная цепь получается по рис. 43. В этом случае между половинами сердечника устраивают канал δ_b , служащий для создания добавочной охлаждающей поверхности. Иногда, при сборке сердечников впритык, в этом же канале помещаются болты, скрепляющие всю выемную часть трансформатора: канал тогда делают шириной $25 \div 50$ мм. Конструкцию броневых трансформаторов см. [Л. 24, табл. XVIII—XXI и XXVII—XXIX].
 ярма—прямоугольная.¹ Отношение можно выбирать, руководствуясь

Таблица 10

Рабочее напряжение в килoвольтах	Отношение h/b
До 11,0	1,75 ÷ 2,25
„ 38,5	2,0 ÷ 2,75
„ 121	2,25 ÷ 3,00

Общее соотношение размеров в плане сердечника броневых трансформаторов характеризуется коэффициентом ζ , причем для однофазных трансформаторов (рис. 43):

$$\zeta = \frac{2l + 4 \frac{b}{2} + \delta_b}{a + 2 \frac{b}{2}},$$

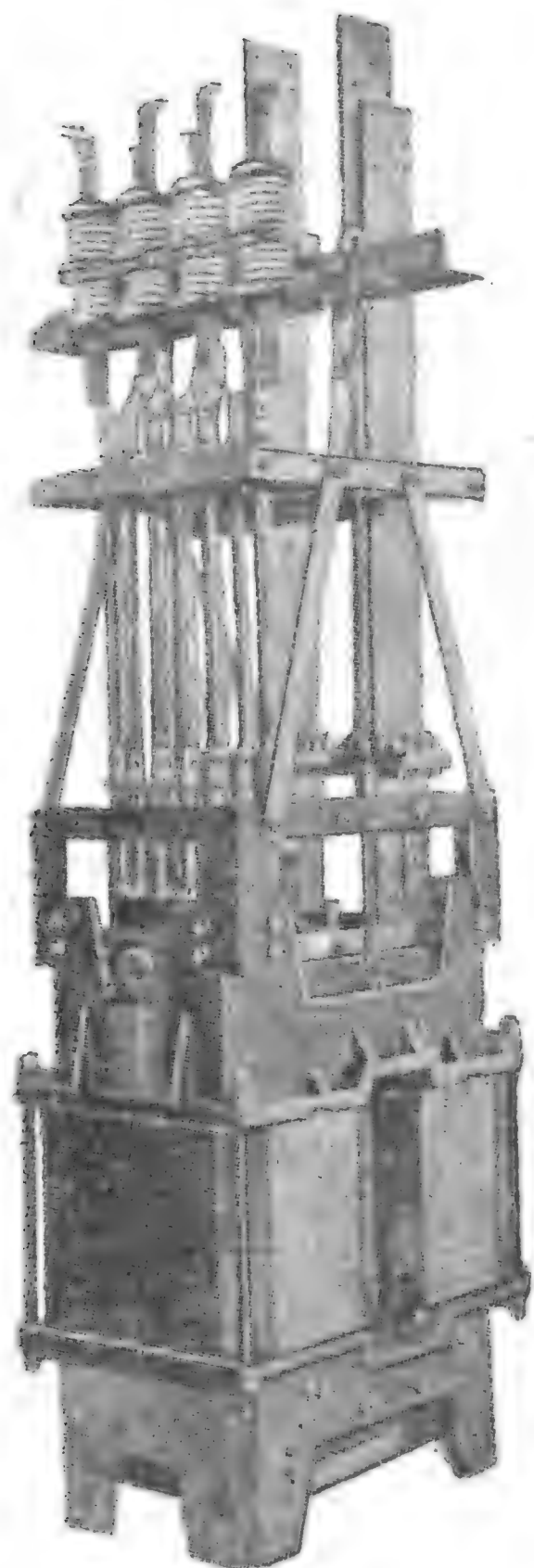


Рис. 44. Броневой трансформатор (печной); крепление сердечника при сборке внахлестку.

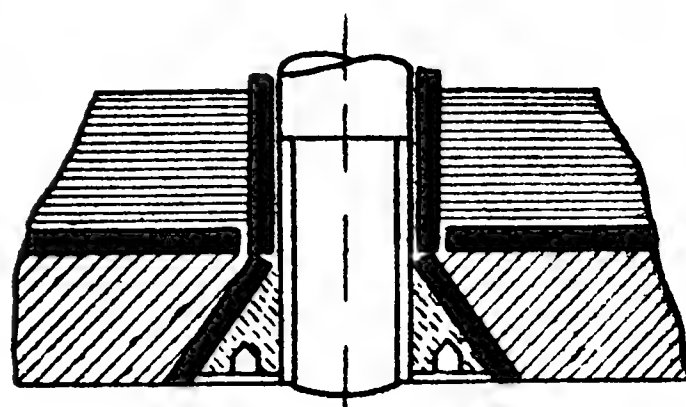


Рис. 45. Крепление сердечников броневых трансформаторов при сборке впритык с постоянными гайками на шпильках.

а для трехфазных:

$$\zeta = \frac{2l + 4 \frac{b}{2} + \delta_b}{3a + 4 \frac{b}{2}}$$

(на рис. 4 канал $\delta_b = 0$).

Чем выше рабочее напряжение трансформатора, тем больше удлиняется окно трансформатора (увеличивается размер a); вследствие этого коэффициент ζ уменьшается.

Можно ориентироваться на следующие значения ζ в зависимости от типа трансформатора и величины рабочего напряжения (табл. 11).

Т а б л и ц а 11

Рабочее напряжение в киловольтах	Значения ζ	
	однофазные трансформаторы	трехфазные трансформаторы
До 11	1,7 ÷ 2 0	0,7 ÷ 0,85
„ 38,5	1,3 ÷ 1 6	0,55 ÷ 0,7
„ 121	0,9 ÷ 1,3	—

Поскольку трехфазные броневые трансформаторы, особенно при высоких напряжениях, получаются чрезмерно вытянутыми в направлении размера a , избегают применения таких трансформаторов при напряжениях 35 kV и выше.

У трехфазных броневых трансформаторов ширину листов средних поперечных пакетов можно, как известно [Л. 3, стр. 138], брать равной $b/2$ при условии, что у обмоток средней фазы переключены начала и концы.

§ 32. Главный магнитный поток

Везде, где упоминается о главном магнитном потоке Φ трансформатора, подразумевается максимальное значение этого потока (значок m опущен).

Главный магнитный поток Φ в трансформаторе обычно считается постоянным вдоль всей магнитной цепи:

$$\Phi = B \cdot S = B_{\pi} \cdot S_{\pi} \text{ Мх.}$$

Для удобства его выражают как кратное 10^6 ; поток Φ условно принимается равномерно распределенным по данному сечению S , а индукция B — постоянной по всему сечению. При ближайшем рассмотрении это представление нуждается в поправках (§ 69).

У броневых сердечников поток Φ , входя в ярмо, распределяется поровну на обе половины последнего. В магнитных системах с принудительным распределением магнитного потока (§ 2, п. 11) значение потока и магнитной индукции в различных частях магнитной цепи подсчитывается специальными методами [Л. 1, стр. 216; Л. 19, стр. 36; Л. 84; там же — указатель литературы; Л. 85].

§ 33. Раскрой листов; определение числа листов для сердечника

При проектировании сердечников важную роль играют соображения о наивыгоднейшем использовании стандартных листов трансформаторной стали (ОСТ 6391, § 25), в особенности при проектировании серии трансформаторов. В этом случае план раскроя листов должен входить в состав проекта серии, иначе

она может оказаться невыгодной из-за большого количества отходов при раскрое листов.

Напротив, правильным выбором размеров сердечника, иногда небольшим и вполне допустимым изменением размеров против первоначального расчета можно снизить количество отходов с $25 \div 30\%$ до $10 \div 15\%$ на всю серию. Иногда же — при проектировании отдельных трансформаторов — можно поступить наоборот: видя, что все равно получаются отходы по длине листов, можно, например, немного увеличить длину стержней, имея в виду, что обмотки могут получиться длиннее, чем следует по расчету, или в будущем может пригодиться тип трансформатора с удлиненными на несколько процентов стержнями. Вообще, полезно иметь в виду следующие указания.

1. От листов стандартного размера (§ 25) примерно по $5 \div 10$ mm с краев всегда идет в отход, ибо края могут быть недостаточно ровно обрезаны, или же смяты; кроме того, качество материала по краям обычно бывает сниженным от резки листов на заводе, их изготовляющем.

2. При намагничении вдоль листов потери в стали получаются на $10 \div 15\%$ меньше, а магнитная проницаемость больше, чем при поперечном намагничении; поэтому раскрой ведут всегда вдоль листов.

3. При выборе числа ступеней и ширин листов (§ 29) стремятся к тому, чтобы размеры $b_1 \dots b_n$ укладывались целое число раз в полезной ширине листа с обрезанными по п. 1 краями.

4. Наибольшая полезная длина листов составляет $2000 - 2 \cdot 10 = 1980$ mm; поэтому очень большие сердечники и ярма приходится составлять из двух, или даже трех частей. При этом избегают коротких приставок, составляя, например, размер 2200 mm из $1500 + 700$ mm, а не $1990 + 210$ mm, и производя надлежащее перекрытие (нахлестку) листов.

5. Полное число листов толщиной δ_c , потребных для сердечника, и размеры их определяются по эскизу сердечника. В общей толщине h пакета поместится $\frac{h \cdot k_c}{\delta_c}$ листов, где h и δ_c — в миллиметрах; k_c — см. § 27.

§ 34. Вес сердечника

Полный вес сердечника определяется по формуле:

$$G_c = \gamma_c \cdot \sum V_c, \quad (45)$$

где суммирование распространено на все объемы V_c , на которые удобно разделить сердечник для геометрических расчетов, и в которых (объемах) — одна и та же индукция (существенно при подсчете потерь); γ_c — см. § 25, ОСТ 6391, п. 14.

Для сердечников, собираемых внахлестку, желательно указывать отдельно вес стержней и ярем для возможности контролировать при сборке число листов по весу. Дело в том, что самой обычной причиной ненормально большого тока холостого хода I_0

и ненормальных потерь P_c является меньший вес сердечника, чем полагается по расчету. Это понятно, если учесть, что для всякого данного трансформатора индукция B при изменении числа листов сердечника будет изменяться обратно пропорционально весу сердечника, тогда как намагничивающие kVA/kG и удельные потери W/kG возрастают скорее, чем возрастает индукция B (§ 65 и 68).

При расчетах объем стержней V_c определяется очень просто:

$$V_c = s \cdot l \cdot S \quad (s — \text{число стержней}).$$

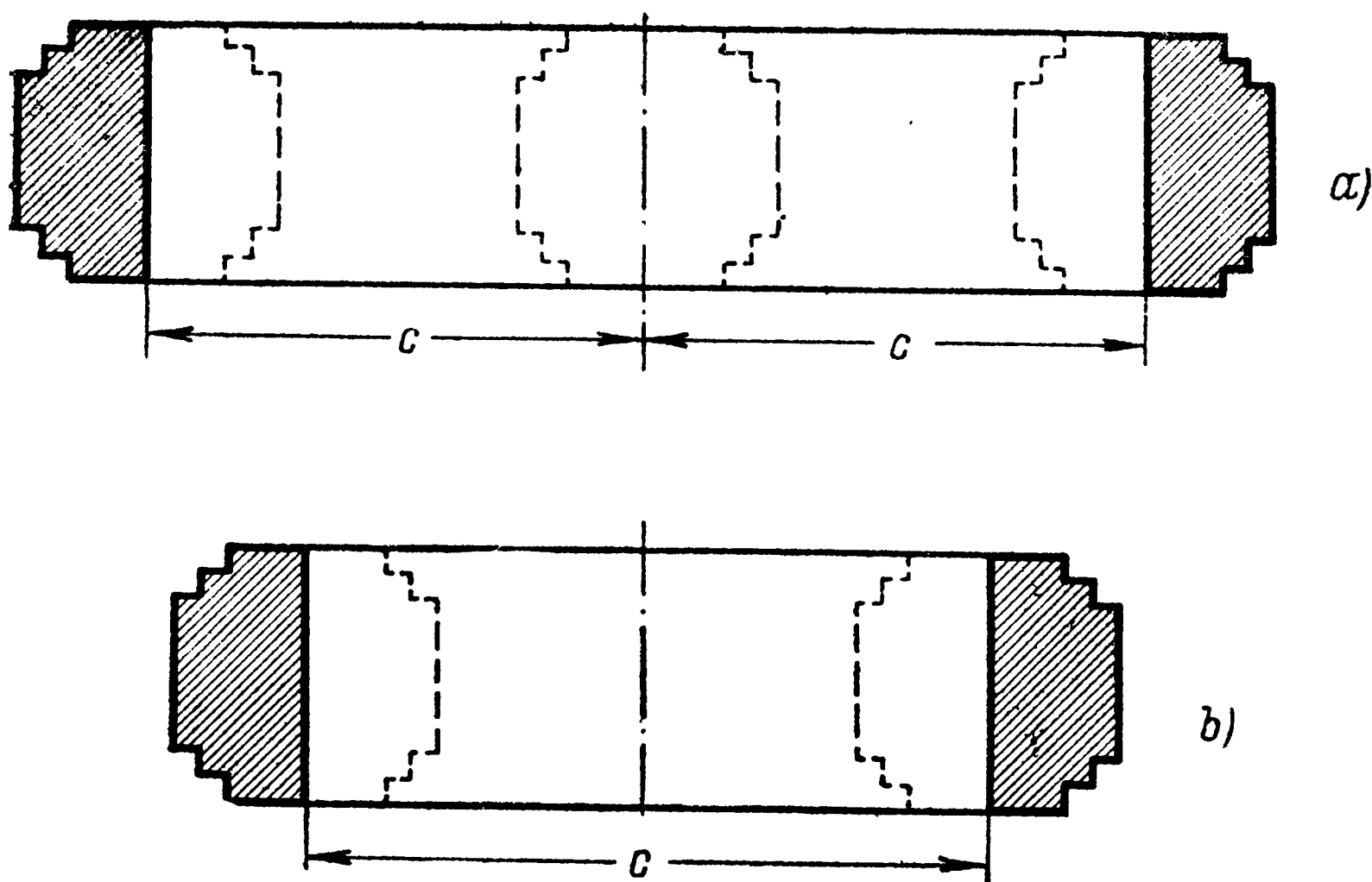


Рис. 46. Определение длины и веса ярма: a —для трехфазных и b —для однофазных трансформаторов; сборка внахлестку.

Что касается объема ярем, то при прямоугольном их сечении и при сборке сердечника впритык все листы ярма одинаковы, и объем обоих ярем:

$$V_{я} = 2 \cdot l_{я} \cdot S_{я}.$$

При сборке сердечника внахлестку и прямоугольном сечении ярем, как видно из рис. 46, очерченная жирной линией площадь дает в сумме площадь сечения S стержня, а значит соответствующий ей объем ярма равен $S \cdot b_{я}$, где $b_{я}$ —ширина листов ярма. Общий объем обоих ярем равен:

для трехфазных трансформаторов $2 [2c \cdot S_{я} + b_{я} \cdot S]$ (рис. 46а), а для однофазных трансформаторов $2 [c \cdot S_{я} + b_{я} \cdot S]$ (рис. 46б).

Если ярма имеют ступенчатую форму, объем их приходится подсчитывать как сумму объемов отдельных пакетов.

РАСЧЕТ И КОНСТРУКЦИЯ ОБМОТОК**А. ОСНОВНЫЕ УКАЗАНИЯ****§ 35. Основные требования, предъявляемые к обмоткам;
задача расчета обмоток**

Поскольку обмотки трансформатора являются наиболее ответственными частями его, к ним относятся важнейшие из основных требований, предъявляемых ко всему трансформатору, а именно:

1) обеспечение достаточной электрической прочности обмоток, что достигается надлежащим выбором изоляции (§ 60 — 63);

2) механическая прочность обмоток против усилий, действующих при коротких замыканиях (§ 105 и 106);

3) надлежащее охлаждение обмоток (§ 87 и 89).

Кроме того, обычно учитываются практические требования:

4) общей конструктивности обмоток, т. е. удобства их сборки, вывода ответвлений, запайки и изолировки отводов и т. д., а также и разборки;

5) стандартности применяемой обмоточной меди и изоляционных деталей;

6) прочие, чисто производственные требования, как то: учет наличия тех или иных обмоточных станков, оправок (шаблонов) и приспособлений, возможность провести надлежащую сушку и пропитку обмоток и т. д.

При выбранном методе расчета трансформатора (§ 13) к расчету обмоток приступают тогда (п. 41 формуляра, § 109), когда основные контуры проектируемого трансформатора уже намечены; проектируя обмотки, их приходится разместить в намеченном уже окне трансформатора. Из предварительного расчета бывает ориентировочно известна высота окна l ; остается точно рассчитать радиальные размеры обмоток, а затем и окончательные размеры окна.

Общая задача проектирования обмоток и изоляции их распадается на отдельные вопросы, разрешаемые в следующем порядке:

1) составление схем соединения обмоток (§ 36);

2) определение числа витков (§ 37 и 38);

3) выбор типа обмоток (§ 39);

4) конструктивное подразделение обмоток, выбор числа катушек (§ 45—51);

5) выбор плотности тока (§ 41);

6) выбор сечения и его размеров, а также изоляции и марки провода (§ 42 и 60);

7) выбор прочих изоляционных деталей (§ 61) и изоляционных расстояний (§ 63);

8) подсчет места, занимаемого обмотками (§ 45—51), и расчет их веса (§ 52).

После расчета обмоток составляется таблица обмоточных данных (п. 42 формуляра), а также эскизы обмоток; если виток состоит из двух или более проводов, то обязательно дается и эскиз витка с указанием направления его оси.

При детальном расчете трансформатора (см. формуляр, § 109) проверяются потери и индуктивность обмоток, а также соответствие их вышеприведенным техническим требованиям.

§ 36. Составление схемы соединения обмоток; обозначение начал и концов обмоток

Выбор схемы соединения производится по указаниям § 16, п. 6. Прежде чем проектировать обмотки детально, надо вычертить схемы соединения обмоток, указав все подробности, как то: соединения между собой обмоток отдельных фаз, ответвления, отводы, регулирующие устройства (§ 43 и 44) и т. д.

Не следует забывать, что для каждой обмотки и каждой катушки должно быть указано — правая она или левая (§ 2, п. 22).

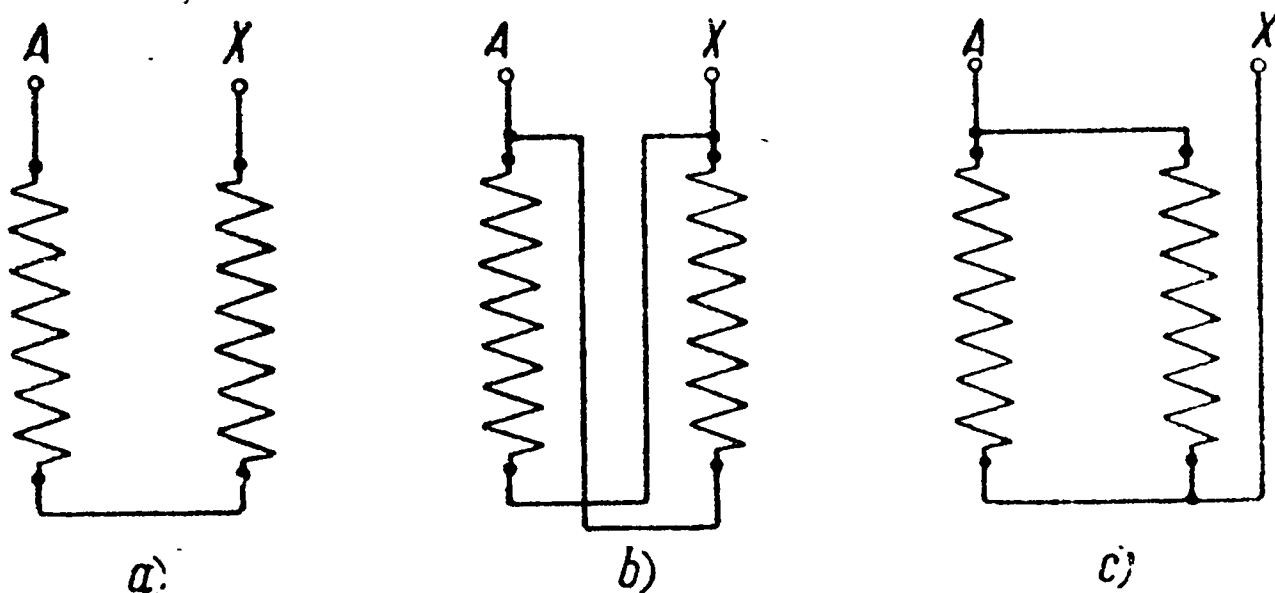


Рис. 47. Соединение обмоток двух стержней однофазного трансформатора.

Для трансформаторов советского производства, как правило, принята левая намотка; отсюда получаются такие следствия.

1. Простые цилиндрические катушки и винтовые обмотки должны быть левыми для трехфазных трансформаторов и для однофазных — при последовательном соединении обмоток двух стержней. Первое положение понятно само собой; нетрудно убедиться также в том, что, намотав обмотки обеих стержней однофазного трансформатора в одну сторону и соединив концы (рис. 47а), получим последовательное соединение обмоток обеих стержней.

2. При параллельном соединении обмоток обеих стержней однофазного трансформатора и при одинаковом направлении намотки на обеих стержнях, пришлось бы взаимно пересекать соединения (рис. 47б), что крайне нежелательно, особенно при высоких напряжениях. Поэтому предпочитают поступиться основным требованием относительно одинакового направления намотки

и применяют правую намотку на одном стержне и левую — на другом. Тогда их можно соединять по рис. 47с.

3. При выборе схемы по рис. 207 с переносом нулевой точки в середину стержня следует наматывать верхние катушки каждой фазы — левыми, а нижние — правыми.

Вообще, при составлении схемы соединений обмоток надо обдумать все возможные варианты работы данной схемы; это в особенности важно при обмотках с параллельными соединениями, с ответвлениями, с возможной несимметрией нагрузок частей вторичной обмотки и т. п.

У трехфазных броневого трансформаторов необходимо, как известно, переменить начала и концы обмоток средней фазы во избежание перенасыщения магнитной цепи в местах *A* (рис. 4); см. также § 31.

Применяемые на схемах обозначения начал и концов обмоток, а также ответвлений см. на рис. 51, из которого можно усмотреть следующие правила:

1) если у начал или концов нет ответвлений, то они обозначаются буквой без индекса, например *A*, *a*, *X* и т. д.

2) если есть ответвления от начала или конца, то все зажимы подряд от данного начала или конца обозначаются буквами с индексами, например *A*₁, *A*₂... или *X*₁, *X*₂... и т. д.

§ 37. Э. д. с., индуцируемая в обмотке; напряжение витка

Основная э. д. с., индуцируемая в обмотке, подсчитывается по формуле:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ V.} \quad (46)$$

При расчетах следует иметь в виду следующее.

1. *E* представляет собой действующее значение э. д. с. в вольтах, тогда как Φ_m есть максимальное значение магнитного потока в максвеллах. Для простоты везде вместо Φ_m принято обозначение Φ без индекса.

2. Формула эта относится только к синусоидальной форме кривой э. д. с. и магнитного потока: при другой форме следует пользоваться более общей формулой:

$$E = 4 \cdot k_f \cdot f \cdot w \cdot \Phi \cdot 10^{-8} \text{ V,} \quad (47)$$

где k_f — коэффициент формы кривой э. д. с., равный для синусоиды 1,11; при острой кривой э. д. с. $k_f > 1,11$, при плоской — $k_f < 1,11$.

3. w — число витков обмотки, соединенных последовательно и пронизываемых потоком Φ ; оно определяется из формулы (46), являющейся одной из основных при расчете трансформаторов.

Так как $\Phi = B \cdot S$, то эту формулу можно переписать еще в таком виде:

$$E = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot B \cdot S \cdot 10^{-8} \text{ V.} \quad (48)$$

Здесь (и в дальнейшем) B без индекса обозначает максимальное значение магнитной индукции в стержне трансформатора, а S — в кв. сантиметрах — сечение стержня.

Разлагая в правой части выражения (48) величину 10^{-8} на множители и помножая и деля эту часть на 50, а обе части разделяя на w , получаем следующее выражение для основной величины всех расчетов трансформаторов, а именно — величины э. д. с. e_w , индуктируемой в одном витке (напряжение витка):

$$e_w = \frac{E}{w} = 2,22 \cdot \frac{f}{50} \cdot \frac{B}{10^4} \cdot \frac{S}{10^2}. \quad (49)$$

Эта формула, именуемая французами формулой Бушери (Boucherot), более наглядна для некоторых расчетов, чем классическая формула (48), и полезна для запоминания, если ее выразить так: „при нормальной частоте ($f=50$ Hz) и индукции $B=10\,000=10^4$ Gs, на каждый квадратный дециметр активного сечения стержня индуктируется э. д. с. в 2,22 V в каждом из витков, охватывающих это сечение“.

Формуле (46) можно придать другой, еще более простой вид для частоты 50 Hz:

$$\frac{E}{w} = 4,44 \cdot 50 \cdot \Phi \cdot 10^{-8},$$

$$\text{т. е. } e_w = 2,22 \cdot \Phi \cdot 10^{-6}, \quad (50)$$

что можно прочесть следующим образом: „при частоте 50 Hz э. д. с., индуктируемая в одном витке, численно равна величине магнитного потока в миллионах максвелл, помноженной на 2,22“.

Пусть, например: $S=1000$ см², $B=14\,000$ Gs. Тогда $\Phi=1000 \times 14\,000=14 \cdot 10^6$ Мх, откуда сразу получается $e_w=2,22 \cdot 14=31,08$ V на один виток.

§ 38. Определение числа витков

Расчет следует начинать с определения числа витков самой низковольтной обмотки; пусть это будет w_2 . Если величина e_w (§ 37) определена или выбрана раньше, тогда:

$$w_2 = \frac{|E_{2\phi}|}{e_w} \approx \frac{U_{2\phi}}{e_w}. \quad (51)$$

Вообще говоря, для w_2 может получиться дробное число; тогда его округляют до ближайшего большего целого числа. Если округлить до меньшего, то тем самым будет увеличен магнитный поток Φ , а значит и индукция B , что может быть нежелательным или даже недопустимым.

Число витков прочих обмоток определится по соотношению э. д. с. или напряжений, например:

$$w_1 = w_2 \cdot \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}. \quad (52)$$

При этом значение w_1 округляется до ближайшего целого числа. Коэффициент трансформации $k_{12} = U_{1\phi} : U_{2\phi}$ должен быть соблюден с точностью до $0,3 \div 0,5\%$; поэтому при больших числах витков, порядка сотен и тысяч, расчеты ведут при помощи таблиц догарифмов.

Если в задании для какой-нибудь обмотки указано несколько различных напряжений (регулировка напряжения), то определяются и все соответствующие числа витков.

Если пределы регулировки не превышают $\pm 5\%$, то в дальнейшем при расчете потерь, сопротивлений, индуктивности и т. д. можно брать среднее число витков (для номинального напряжения), но, конечно, при подсчетах места, потребного для обмотки, конструктивного веса обмотки и т. д. надлежит учитывать полное (наибольшее) число витков. В специальных трансформаторах с широкой регулировкой все расчеты проводятся для каждой ступени регулировки.

Вся обмотка трансформатора может иметь только целое число витков;¹ напротив, отдельные катушки могут иметь и дробное число витков: например 20 катушек по $10\frac{1}{2}$ витков, всего 210 витков, или 32 катушки по $2\frac{1}{16}$ витка, всего 66 витков, и т. п. Для выполнения таких обмоток существуют специальные методы намотки; см. например [Л. 27 и 28].

§ 39. Выбор типа обмоток

Проектирование обмотки начинается с выбора типа ее. Последний обуславливается в основном: 1) типом самого трансформатора, 2) числом витков обмоток, 3) сечением витков, 4) рабочим напряжением каждой обмотки и 5) охлаждением и укреплением обмотки. Следующие общие положения необходимо иметь в виду при проектировании обмоток.²

Круглая форма катушек имеет по сравнению с прямоугольной преимущества: большей простоты при изготовлении, относительно меньшей длины витка при том же сечении стержня и большей прочности при коротких замыканиях (§ 105 и 106). Кроме того, практика показала, что наиболее часто встречающиеся повреждения обмоток, а именно — витковые замыкания, происходят у прямоугольных катушек чаще, чем у круглых, так как у первых на углах при намотке изоляция подвергается сильному сжатию с внутренней стороны витка и растяжению — с наружной.

Обмотки концентрические наиболее часто применяются для обычных стержневых трансформаторов (для броневых лишь по типу рис. 5). Каждая из концентрических обмоток может состоять

¹ Однако при некоторых специальных формах броневых сердечников принципиально возможно получить дробное число витков в обмотках [Л. 86]; практически, впрочем, этим никогда не пользуются вследствие возникающей неуравновешенности в разветвленной магнитной цепи.

² Терминологию по обмоткам см. § 2.

из одной цилиндрической или из ряда дисковых катушек. Вообще, как правило, внутри помещается обмотка низшего напряжения, требующая меньшей изоляции от земли, однако иногда, при наличии в обмотке многих ответвлений, при значительном сечении отводов и т. д., приходится располагать снаружи низковольтную обмотку.

Обмотки чередующиеся применяются: для броневых трансформаторов с прямоугольным сердечником (рис. 3 и 4), для стержневых — при воздушном охлаждении и при горизонтальных стержнях, а при масляном охлаждении — для низковольтных (печных и т. п.) трансформаторов, мощностью примерно до 5000 kVA, если высшее напряжение не превосходит $10 \div 20$ kV. Большим преимуществом является при этом возможность параллельного соединения групп низковольтной обмотки.

О влиянии типа трансформатора на конструкцию обмоток см. § 16; о производстве обмоток см. § 4, п. 2.

Ниже, в § 45—51, приведены методы расчета разных обмоток, указаны преимущества и недостатки разных типов обмоток и уточнена область их применения.

§ 40. Материал обмоток

В качестве материала для обмоток применяется обмоточный провод согласно ОСТу 8616, приводимому ниже в выдержках.

Согласно ОСТу материал именуется медью обмоточной, голой и изолированной.

Стандарт распространяется на:

а) голую и изолированную с волокнистой изоляцией медь, круглых и прямоугольных сплошных сечений, применяемую в электромашиностроении и электроаппаратостроении;

б) голую шинную и ленточную медь, применяемую для монтажа распределительных устройств и для иных электротехнических целей.

Примечание. Стандарт не распространяется на эмалированную медную проволоку и на проволоку с асбестовой изоляцией.

А. Классификация

1. Медь обмоточная, ленточная и шинная подразделяется на следующие марки:

МГМ — медь голая мягкая;

ПБД — изоляция двумя слоями хлопчатобумажной обмотки;

ПЭБД — изоляция эмалевая и двумя слоями хлопчатобумажной обмотки;

ПББО — изоляция несколькими слоями обмотки лентой из кабельной бумаги и несплошной обмоткой хлопчатобумажной пряжей.

2. По форме сечения медь подразделяется на круглую и прямоугольную.

Прямоугольная медь (табл. 12) в свою очередь подразделяется на:

а) проволочную прямоугольную медь, выделенную в таблице сплошными жирными линиями; эта медь делается как голой, так и изолированной хлопчатобумажной пряжей и кабельной бумагой;

б) ленточную медь, выделенную пунктирными линиями; эта медь изготавливается только голой;

с) шинную обмоточную медь и шинную конструктивную, выделенные тонкими двойными линиями; эта медь изготавливается только голой.

Б. Технические условия

3. Размеры, допуски и веса одного километра круглой меди без изоляции указаны в табл. 13.

4. Медная круглая проволока, диаметром 0,10 мм и выше, должна удовлетворять марке ММ ОСТ 7940, причем, после наложения на нее изоляции, у медной проволоки допускается уменьшение удлинения при разрыве на 2% против данных для марки ММ ОСТ 7940.

5. Прямоугольная голая и изолированная медь должна изготавливаться из медных вайербарсов по ОСТ 7029 и поставляться в мягком (отожженном) виде.

Временное сопротивление на разрыв прямоугольной и мягкой (отожженной) меди до наложения изоляции должно быть не менее 21 кГ/см². Удлинение в процентах должно быть соответственно:

для сечения	4,5	12	28	75	выше 75 мм ²
	28	30	32	34	36%

После наложения изоляции для этой меди допускается уменьшение удлинения на 2% против величин, указанных выше.

Временное сопротивление на разрыв твердотянутой прямоугольной шинной меди марки МГТ должно быть не ниже следующих величин:

для сечения	до 500 мм ²	не менее	30 кГ/мм ²
"	более 500 "	"	25

6. Поверхность меди, предназначенной для наложения на нее изоляции, должна быть чистой и гладкой.

7. Прямоугольная медь может иметь выпуклость и вогнутость в пределах допусков по табл. 14.

При загибе прямоугольной меди на 180° вокруг стержня с диаметром, равным толщине испытуемой меди, она не должна давать трещин, расслоения, явного пружинения и т. п.

8. Края прямоугольной меди марки МГМ, как голой, так и изолированной, должны быть закруглены радиусом в зависимости от меньшей стороны α сечения (рис. 48 а).

При $\alpha \leq 2,0$ мм края должны быть закруглены настолько, чтобы не было острых граней; радиус закругления приблизительно равен 0,25 ÷ 0,50 мм; при $\alpha > 2,0$ мм до 7 мм радиус закругления: 0,5 ÷ 0,7 мм; при $\alpha > 7,0$ мм радиус закругления: 0,71 ÷ 1 мм.¹

9. Толщина изоляции для круглой и прямоугольной меди указана в табл. 15 и 16; в этих же таблицах даны допуски на толщину изоляции.

Примечание. Допускается увеличение допусков на толщину изоляции против табл. 15 и 16 с тем однако, чтобы максимальные размеры изолированной меди не превышали номинальных размеров, увеличенных на сумму плюсовых допусков для меди и изоляции.

10. Бумага, употребляемая для изготовления обмоточной меди марки ПББО, должна удовлетворять ОСТ 6321 на кабельную бумагу или ОСТ 6272 на телефонную бумагу.

При пользовании таблицами и данными ОСТ 8616 нужно иметь в виду следующее.

1. Размеры α и β прямоугольного сечения (табл. 12) подобраны так, что возрастают по геометрической прогрессии с множителем 1,08. Поэтому по диагоналям с левого нижнего к правому верхнему углу получают одинаковые величины сечения.

¹ Поэтому при точных расчетах надо учитывать это закругление и получающееся уменьшение сечения.

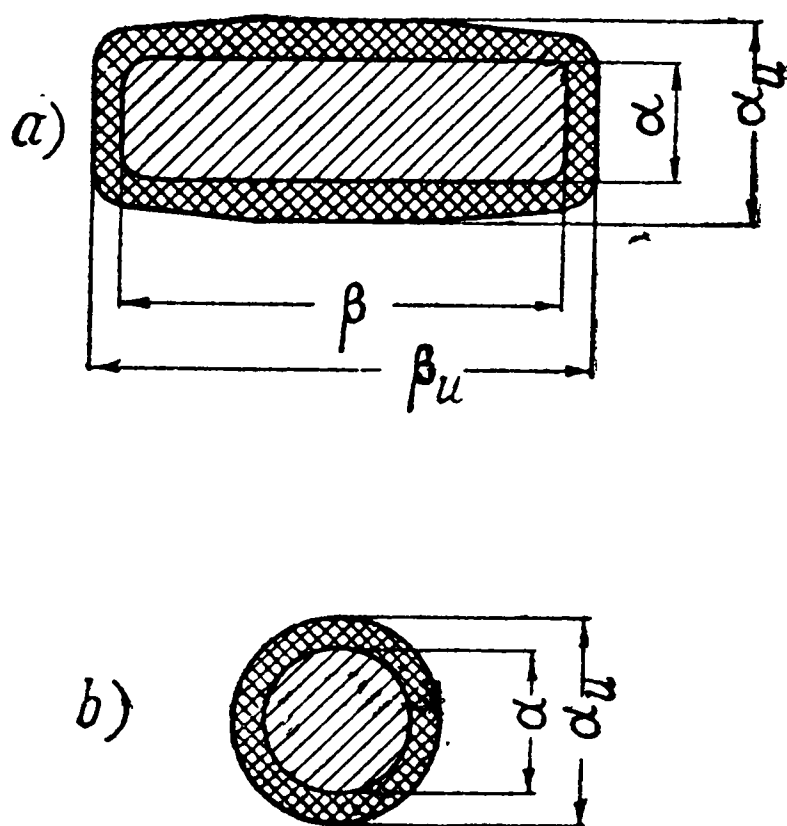


Рис. 48. Размеры сечений обмоточного провода.

Таблица 13

Размеры, допуски и веса круглой обмоточной меди (без изоляции)

Номинальный диаметр мм	Допускаемые отклонения мм	Номинальная площадь сечения мм ²	Вес одного километра кг	Номинальный диаметр мм	Допускаемые отклонения мм	Номинальная площадь сечения мм ²	Вес одного километра кг
1	2	3	4	1	2	3	4
0,05	± 0,003	0,00196	0,0175	(0,83)	± 0,015	0,54106	4,822
0,06		0,00283	0,0252	0,86		0,58088	5,177
0,07		0,00385	0,0343	(0,90)		0,63617	5,670
0,08		0,00502	0,0448	0,93		0,67929	6,054
0,09		0,00636	0,0567	(0,96)		0,72382	6,451
0,10		0,00785	0,070	1,00		0,78540	7,000
0,11		0,00950	0,085	(1,04)		0,8495	7,872
0,12		0,01131	0,101	1,08		0,9161	8,165
0,13		0,01327	0,118	(1,12)		0,9852	8,781
0,14		0,01539	0,137	1,16		1,0568	9,410
0,15	± 0,005	0,01767	0,158	(1,20)	± 0,02	1,1310	10,081
0,16		0,02011	0,179	1,25		1,2272	10,937
0,17		0,02270	0,202	(1,30)		1,3273	11,830
0,18		0,02545	0,227	1,35		1,4314	12,757
0,19		0,02835	0,253	(1,40)		1,5394	13,721
0,20		0,03142	0,280	1,45		1,6513	14,717
0,21		0,03464	0,309	(1,50)		1,7671	15,750
0,23		0,04155	0,370	1,56		1,9113	17,035
0,25		0,04909	0,437	(1,62)		2,0612	18,371
0,27		0,05726	0,510	1,68		2,2167	19,757
0,29	± 0,01	0,06605	0,589	(1,74)	± 0,025	2,3779	21,194
0,31		0,07548	0,673	1,81		2,5730	22,933
0,33		0,08553	0,762	(1,88)		2,7759	24,742
0,35		0,09621	0,857	1,95		2,9865	26,617
0,38		0,11341	1,011	(2,02)		3,2047	28,563
0,41		0,13202	1,177	2,10		3,4637	30,870
0,44		0,15205	1,355	2,26		4,0115	35,753
0,47		0,17349	1,546	2,44		4,6759	41,675
0,49		0,18848	1,675	2,63		5,4325	48,418
0,51		0,20428	1,821	2,83		6,2902	56,062
(0,53)	± 0,015	0,22051	1,960	3,05	± 0,04	7,3062	65,117
0,55		0,23758	2,118	3,28		8,4496	75,309
(0,57)		0,25505	2,267	3,53		9,7868	87,226
0,59		0,27340	2,437	3,80		11,3410	101,08
(0,62)		0,30181	2,691	4,10		13,2030	117,50
0,64		0,32170	2,877	4,50		15,9040	141,50
(0,67)		0,35256	3,142	4,80		18,0960	161,10
0,69		0,37393	3,333	5,20		21,2370	189,00
(0,72)		0,40715	3,629	5,50		23,7580	211,80
0,74		0,43008	3,833	6,00		28,2740	252,00
(0,77)	± 0,015	0,46556	4,150	6,50	± 0,06	33,1830	295,75
0,80		0,50265	4,430	7,00		38,4840	343,00

Примечание. Размеры, стоящие в скобках, являются нерекомендуемыми для малых партий, но обязательными для заводов-поставщиков.

2. Так как все размеры как самого сечения, так и толщины изоляции даются с допусками (табл. 14, 15 и 16), то при расчете места, занимаемого обмоткой, все размеры следует брать с допуском в сторону увеличения.

3. Для многовитковых дисковых катушек броневых трансформаторов надо учитывать утолщение изоляции на широкой с ороне сечения. Коэффициент κ_u утолщения изоляции показывает, во сколько раз она толще на широкой стороне β сечения по сравнению с толщиной на узкой стороне α .

Примерно можно считать

$$\kappa_u = 1 + 0,1 \left(\frac{\beta}{\alpha} + 1 \right).$$

При $\frac{\beta}{\alpha} = 3 \quad \kappa_u = 1,2;$

при $\frac{\beta}{\alpha} = 10 \quad \kappa_u = 1,9.$

Т а б л и ц а 14

Допуски на голую прямоугольную медь (без изоляции)

Размеры α или β mm	Предельные отклонения mm
0,10÷ 0,25	$\pm 0,01$
0,30÷ 1,16	$\pm 0,02$
1,25÷ 1,95	$\pm 0,03$
2,10÷ 2,83	$\pm 0,04$
3,05÷ 4,4	$\pm 0,05$
4,7 ÷ 9,3	$\pm 0,07$
10,0 ÷ 14	$\pm 0,09$
16 ÷ 20	$\pm 0,12$
22 ÷ 25	$\pm 0,15$
28 ÷ 35	$\pm 0,20$
40 ÷ 55	$\pm 0,25$
60 ÷ 80	$\pm 0,30$
90 ÷ 120	$\pm 0,35$

Что касается применения алюминия для обмоток трансформаторов, то он имеет и преимущества и недостатки.

Для трансформаторов с воздушным охлаждением М. Видмар [Л. 4, стр. 487] усматривает преимущество в том, что при равном сопротивлении сечение алюминиевого провода будет в 1,7 раз

Т а б л и ц а 15

Толщина изоляции круглой обмоточной меди (рис. 48b); размеры в миллиметрах

Марка провода	Диаметр голого провода									
	0,50÷0,69		0,70÷0,99		1,00÷1,49		1,50÷2,10		2,11÷5,20	
	α_u — α	допускаем. отклонения +	α_u — α	допускаем. отклонения +	α_u — α	допускаем. отклонения +	α_u — α	допускаем. отклонения +	α_u — α	допускаем. отклонения +
ПБД	0,2	0,02	0,2	0,02	0,25	0,02	0,25	0,02	0,3	0,03
ПЭБД	0,24	0,03	0,25	0,03	0,30	0,03	0,30	0,03	—	—
ПББО	—	—	—	—	0,45	0,05	0,45	0,05	0,45	0,05
	—	—	—	—	0,95	0,10	0,95	0,10	0,95	0,10
	—	—	—	—	—	—	1,35	0,15	1,35	0,15
	—	—	—	—	—	—	—	—	1,95	0,15
	—	—	—	—	—	—	—	—	2,95	0,25
	—	—	—	—	—	—	—	—	4,40	0,30
	—	—	—	—	—	—	—	—	5,80	0,40

Таблица 16

Толщина изоляции прямоугольной обмоточной меди (рис. 48а); размеры в миллиметрах

Меньшая сторона сечения α	0,9 ÷ 1,95		2,1 ÷ 3,8		4,1 ÷ 5,5	
Толщина изоляции и допускаемые отклонения	β — β_u	допускаем. отклонения ±	β — β_u	допускаем. отклонения ±	β — β_u	допускаем. отклонения ±
Марка провода						
ПБД	0,25	0,02	0,30	0,03	0,40	0,04
ПББО	0,45	0,05	0,45	0,05	0,50	0,05
	0,95	0,10	0,95	0,10	0,95	0,10
	1,35	0,15	1,35	0,15	1,35	0,15
	—	—	1,95	0,15	1,95	0,15
	—	—	—	—	2,95	0,25
	—	—	—	—	4,40	0,30
	—	—	—	—	5,80	0,40

больше, чем медного. При этом увеличатся и размеры катушек, а значит и поверхность охлаждения обмоток.

При этом предполагается, что алюминиевый провод будет иметь ту же изоляцию, что имел медный. Однако на первом всегда имеется слой окисла ничтожной толщины, но весьма большой электрической прочности и при том обладающий теплоустойчивостью. Применяя оксидированный алюминиевый провод, можно сэкономить почти все место, занимавшееся прежде изоляцией, и одновременно повысить допускаемую для обмотки температуру.¹

К числу недостатков алюминия можно отнести трудность устройства соединений в обмотках; практически хорошо удается лишь электрическая сварка концов проводов встык, пайка же часто дает плохие результаты.

Для нормальных типов трансформаторов с масляным охлаждением применение алюминия с обычной изоляцией ведет к понижению мощности данной модели трансформатора на 20 ÷ 25%.

Поэтому применение алюминия для обмоток трансформаторов пока не вышло из стадии опытов и представляет, возможно, проблему будущего.

§ 41. Выбор плотности тока

На выбор плотности тока Δ в обмотках влияют следующие факторы: тип и назначение трансформатора, его мощность и напряжение, а также система охлаждения. Величина Δ в значи-

¹ Конечно, если такая обмотка будет соприкасаться с обычными изоляционными деталями из пресшпана, дерева и т. п., то допускаемая температура ее не может быть повышена против норм (§ 81).

тельной степени определяет экономику трансформатора. При предварительном расчете можно выбирать плотность тока Δ на основе табл. 17, где столбец I относится к трансформаторам, „богатым медью“, а столбец II — к трансформаторам, „бедным медью“ (§ 10).

При детальном проектировании следует руководствоваться следующими указаниями.

1. Для более мощных трансформаторов выбирают плотности тока большие, чем для трансформаторов мелких (независимо от системы охлаждения); это делается для снижения веса обмоток и уменьшения занимаемого ими места, а вместе с тем и габаритов всего трансформатора.

При этом обмотки приходится усложнять, разделяя их на отдельные катушки и устраивая охлаждающие каналы (§ 85) с тем, чтобы, несмотря на увеличение Δ , величина удельной тепловой загрузки q поверхности обмотки не выходила из норм (§ 84).

2. При увеличении Δ пропорционально снижается вес меди G_m , а потери P_m в меди увеличиваются пропорционально первой степени Δ , так как:

$$P_m = 2,4 \cdot \Delta^2 \cdot G_m \quad \text{W (§ 71).}$$

К. п. д. трансформатора при этом понижается, но уменьшается стоимость обмоток, размер окна и отчасти вес сердечника; одновременно приходится увеличить активную поверхность бака (или иного охладителя) и его размеры, а также вес масла.

3. У трансформаторов с воздушным охлаждением плотности тока приходится брать очень небольшими из-за малой теплоотдачи охлаждающему воздуху, в особенности для поверхностей катушек, обращенных к внутренним каналам (§ 82, конец); ввиду отсутствия масла для этих трансформаторов можно иногда поднять температуру обмоток (при условии применения теплостойкой изоляции), а плотности тока выбирать по высшему пределу столбца II (табл. 17).

Таблица 17

Система охлаждения трансформаторов	Плотность тока Δ А/мм ²	
	I	II
Естественное воздушное охлаждение	1,2 ÷ 1,8	1,7 ÷ 2,8
Естественное масляное охлаждение:		
для многослойных катушек . . .	1,5 ÷ 2,0	1,7 ÷ 2,8
для однослойных катушек . . .	1,8 ÷ 2,7	3,0 ÷ 4,2
Принудительная циркуляция масла	—	4,0 ÷ 5,5

4. Для высоковольтных обмоток с большим количеством изоляции на проводе (и иногда, добавочно, на целых катушках) плотность тока приходится брать меньшей по сравнению с обмотками низковольтными; то же — для начальных катушек с усиленной изоляцией по сравнению с катушками промежуточными и для многослойных катушек по сравнению с однослойными.

5. Чем эффективнее система охлаждения, тем больше можно выбирать плотность тока Δ .

6. При выборе плотности тока Δ для обмоток из однослойных и двухслойных катушек очень удобно пользоваться зависимостями между величинами Δ , толщиной катушки (β для дисковых катушек и α для цилиндрических) и величиной q — удельной тепловой загрузки поверхности охлаждения катушки.¹ По допустимой величине q можно прямо определить максимальную допустимую плотность тока в катушках данной толщины, охлаждаемых с одной или с двух сторон, и обратно — определить наибольшую допустимую толщину катушек при выбранной плотности тока.

§ 42. Определение сечения провода

Необходимая площадь сечения провода определяется по формуле:

$$S_{\text{ж}} = \frac{I_{\phi}}{\Delta} \text{ мм}^2. \quad (53)$$

По величине $S_{\text{ж}}$ производится окончательный выбор сечения (по табл. 13 для круглого и табл. 12 для прямоугольного провода), причем выбирается ближайшее из имеющихся сечений. Если для одной обмотки приходится взять ближайшее меньшее сечение, то для другой выбирают ближайшее большее. При выборе формы сечения руководствуются следующими соображениями.

Круглый провод применяется диаметром до 3 мм, т. е. сечением до 7 мм² (преимущественно для многорядных катушек).

Если при расчете по формуле 53 сечение получается 8 мм² и больше, то выбирают прямоугольный провод. Причина лежит в том, что, с одной стороны, при круглом проводе большого диаметра получается пониженный коэффициент заполнения сечения катушек активным проводом, с другой же стороны, является необходимость в лучшем охлаждении больших сечений путем перехода на однослойные обмотки, у которых каждый провод имеет индивидуальное охлаждение, по крайней мере с одной стороны (рис. 123*b*), или даже с двух (рис. 123*a* и *c*). Применения квадратного и прямоугольного провода для многорядных катушек избегают — хотя он дает больший коэффициент заполнения, чем провод круглый — потому, что при переходах из слоя в слой очень часто происходит порча изоляции провода, а именно пере-

¹ См. § 84.

резывание ее острым ребром самого провода, несмотря на прокладывание пресшпана и т. п. под это ребро. Кроме того, квадратный провод, в особенности небольших размеров ($2 \div 2,5$ mm), может лечь на предыдущий слой острым ребром, что неминуемо поведет к „витковому“ замыканию в этом месте.

Вопрос о выборе сторон α и β прямоугольного сечения подробно разобран ниже, в § 45—51, при рассмотрении проектирования наиболее распространенных типов обмоток.

Если для больших токов расчет по формуле (53) дает величину сечения большую, чем наибольшее из имеющихся сечений изолированного провода (табл. 12), то виток составляют из двух или большего числа проводов,¹ или же (реже) выбирают провод неизолированный, а виток при намотке изолируют лентой и полоской пресшпана, которая в дисковых катушках укладывается плашмя (рис. 49а), а в цилиндрических — на ребро (рис. 49б). Толщину ленты можно считать $0,6 \div 0,8$ mm на обе стороны.

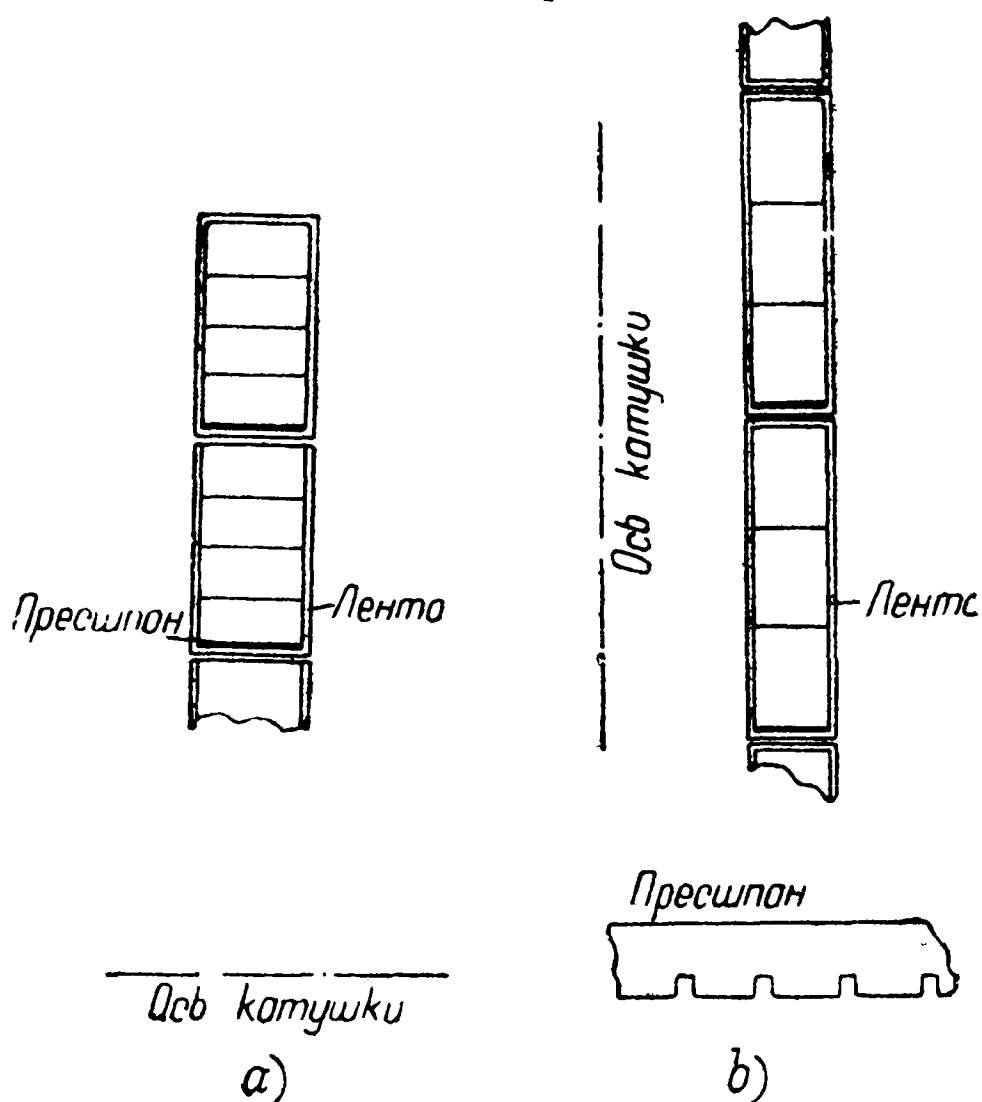


Рис. 49. Дсбавочная изоляция витков.

§ 43. Способы регулирования напряжения и устройство ответвлений

Различают, как известно, регулировку напряжения без нагрузки и под нагрузкой; она может производиться в основном трансформаторе („встроенная регулировка“) или может быть вынесена во вспомогательный „регулирующий“ трансформатор. Регулировка сводится к изменению числа витков обмотки, для чего обмотка разбивается на переключаемые группы, от которых делаются ответвления. Изложенное в настоящем параграфе относится преимущественно к регулировке без нагрузки.

При устройстве ответвлений стараются соблюсти следующие условия: а) удобство выполнения, б) надежность изоляции в месте ответвления, с) возможно меньшее нарушение симметричности обмоток (§ 2, п. 27).

При расчетах следует точно указывать, в каких катушках

¹ Но не более, чем двух разных сечений, имеющих или равные толщины или равные ширины (в зависимости от взаимного размещения проводов).

и после которого витка, считая изнутри катушки, надо сделать ответвления.

Лучше всего выключать целые катушки или целые слои обмотки, но иногда приходится делать ответвления и из середины катушек. Для выполнения ответвления нужно добавочное место

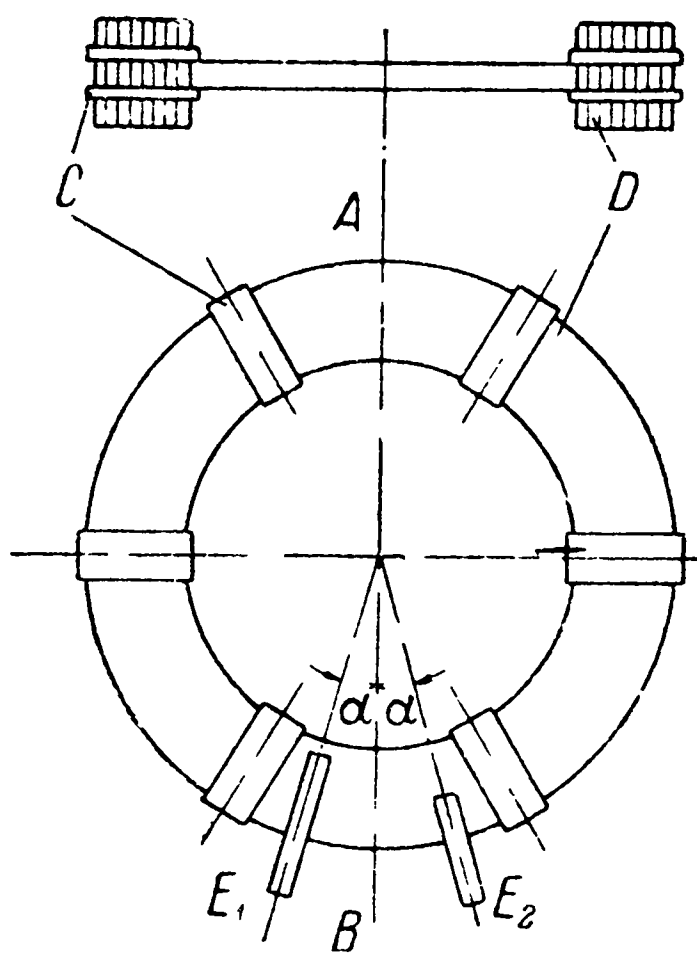
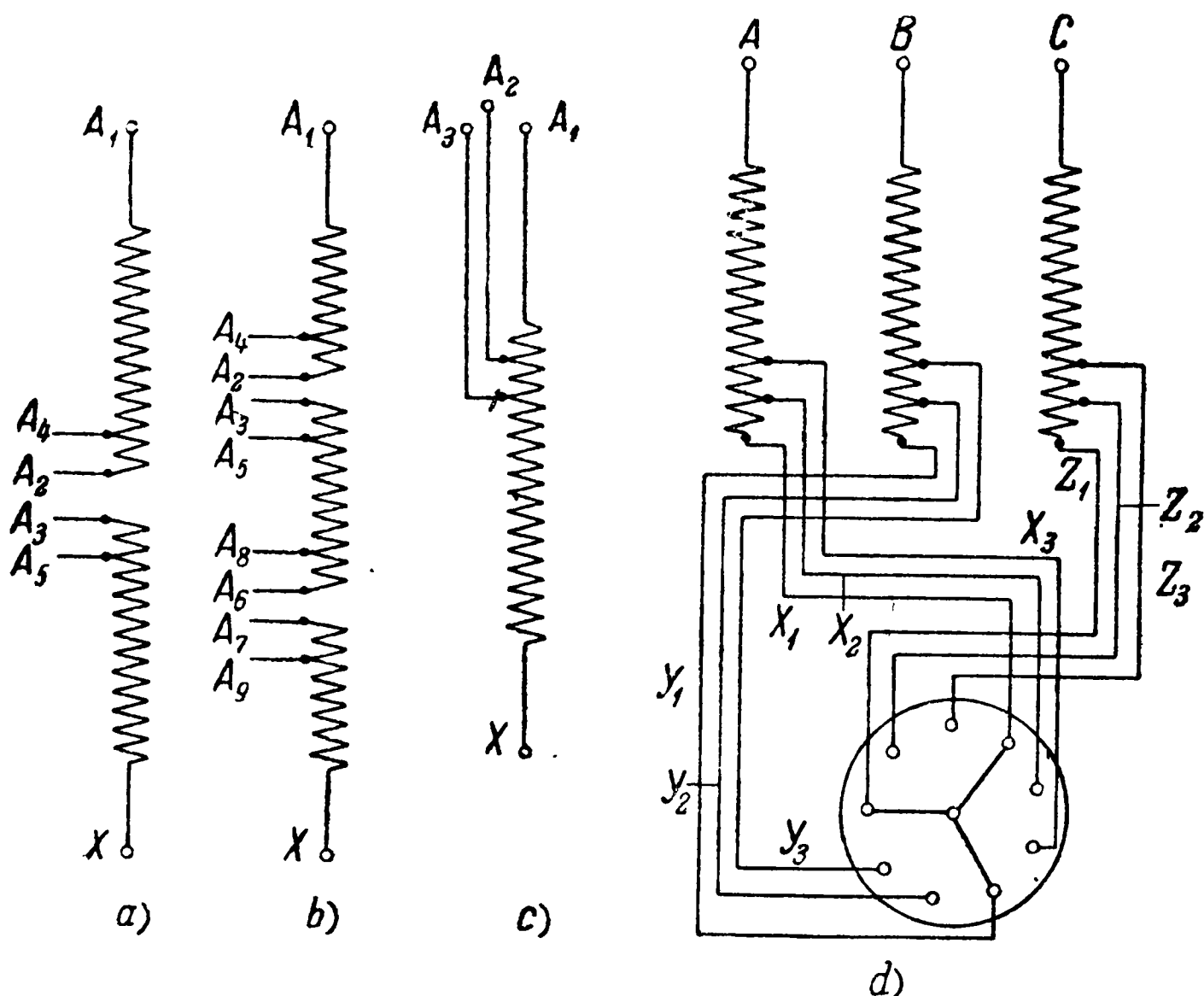


Рис. 50. Размещение ответвлений E_1 и E_2 в дисковых катушках; D , C — радиальные опорные прокладки.

как по длине, так и по толщине катушки (рис. 60). Это важно учитывать при большом числе ответвлений, которые тогда стараются разместить в разных местах полуокружности катушки, указывая углы α , на которые смещены ответвления E_1 и E_2 относительно оси AB (рис. 50).

Если пределы регулировки не превосходят $\pm 5\%$, то при концентрических обмотках регулируемые витки располагают в одном месте по оси обмотки (рис. 51a); при более широких пределах регулировки выключаемые витки распределяют в двух местах обмотки (рис. 51b); при чередующихся обмотках даже при регулировке $\pm 5\%$ распределяют по 5% регулирующихся витков на две группы катушек.

Расположение по рис. 51c дает возможность применить трехклеммные изоляторы и простейшим способом производить переключе-



[Рис. 51. Различные способы расположения ответвлений.

чения на крышке бака (на изоляторах), не прибегая к применению переключателя или устройству лаза в крышке для переключений (см. ниже); однако вследствие ряда недостатков это расположение применяется лишь для мелких трансформаторов.

Расположение по рис. 51*d* для трехфазных трансформаторов удобно тем, что позволяет применить один общий трехфазный переключатель.

При расположении по рис. 208 нулевая точка перенесена на середину стержня, что дает преимущество большей симметричности обмоток, чем в первых двух случаях. Иногда при этом

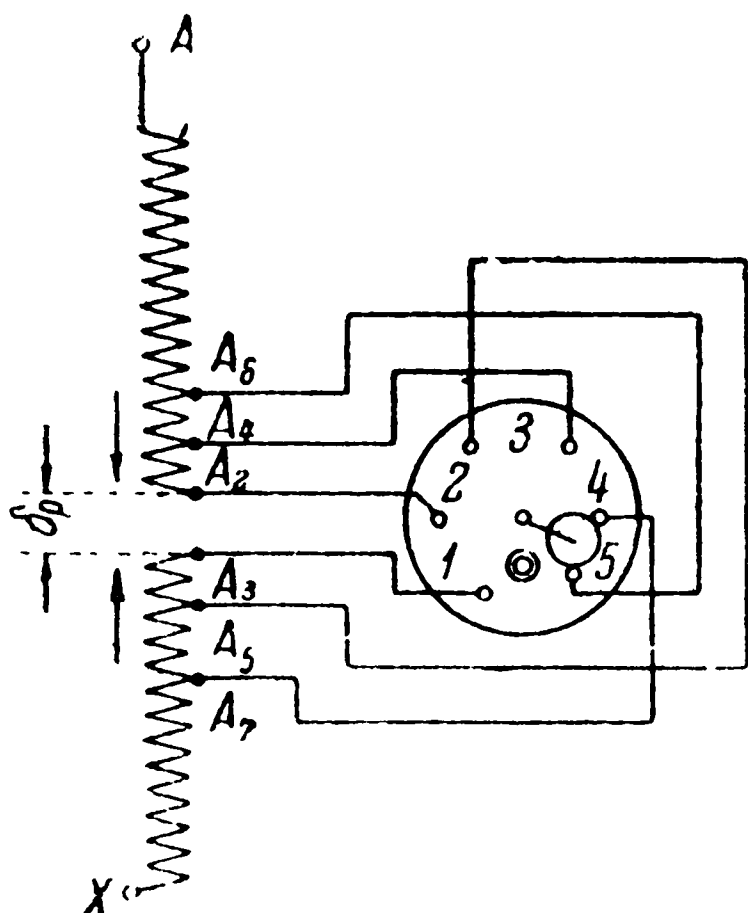


Рис. 52. Схема переключателя GECO.

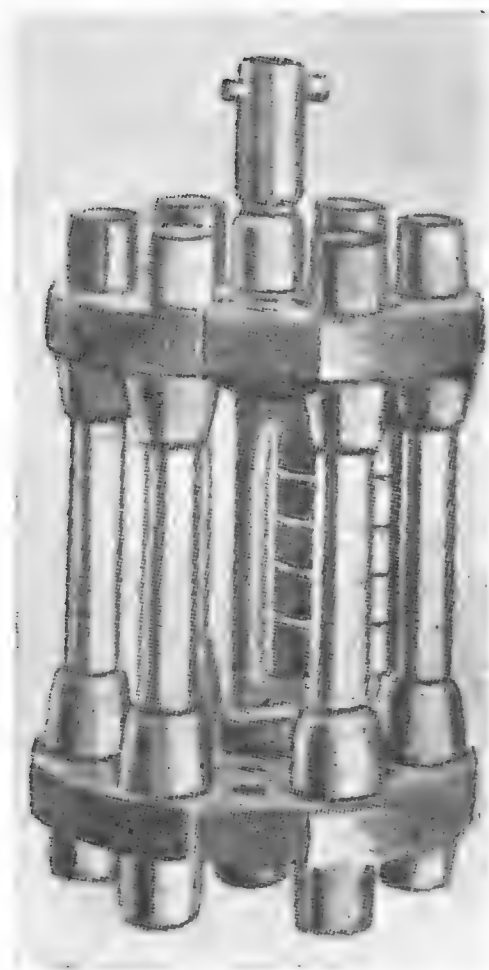


Рис. 53. Вид переключателя GECO.

ограничиваются простой клеммовой доской, помещаемой под крышкой бака; в этом случае в крышке делают лаз для переключений или же применяют переключатель.

Расположение по рис. 52 применяется преимущественно для мощных трансформаторов; при этом для трехфазных приходится ставить три отдельных переключателя, так как между серединами обмоток разных фаз действует половина линейного напряжения. При однофазных трансформаторах можно обойтись одним переключателем, применяя правую и левую намотку на обоих стержнях, соединяемых параллельно (рис. 219, обмотка 2). Следует учесть, что при соединении между собою точек A_6 и A_7 (как на рис. 52) в месте δ_p разрыва обмотки действует полное напряжение, развивающееся между точками A_2 и A_3 ; изоляция разрыва δ_p должна быть сделана с достаточным запасом (§ 63). Иногда вообще все выключаемые витки снабжают несколько усиленной изоляцией.

На рис. 53 показан вид переключателя, схема которого дана на рис. 52.

§ 44. Выполнение ответвлений и отводов; вывод нулевой точки

Отводы (§ 2, п. 36), особенно при высоких напряжениях, являются весьма ответственной деталью трансформатора, требующей специального расчета и конструирования (выбор изоляции и изоляционных расстояний см. § 63). Материал отводов — специальный кабель, круглый провод или шины.

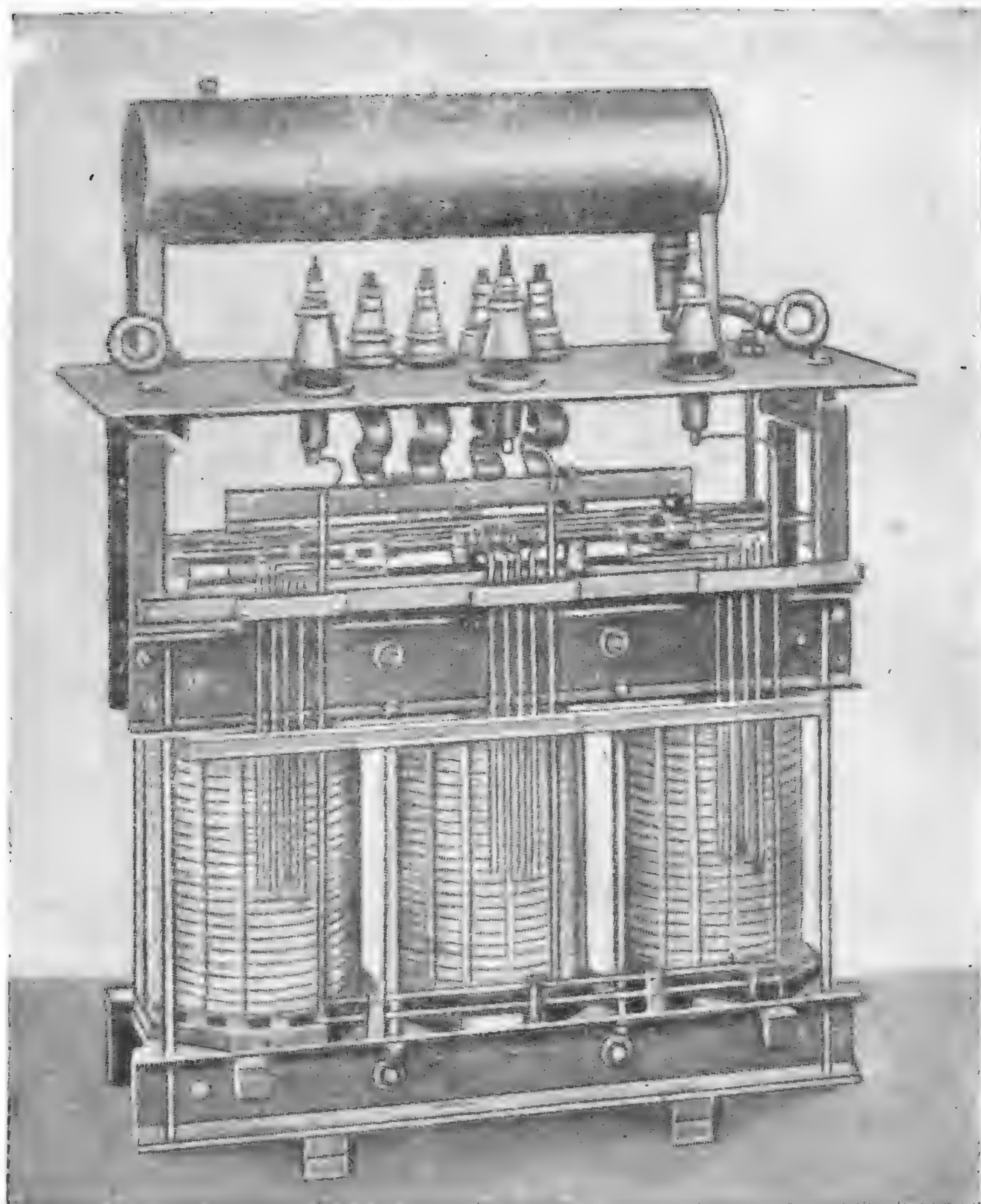


Рис. 54. Выполнение отводов со стороны высшего и низшего напряжения.

Отводы требуют хорошей пайки и надежного укрепления; для изолировки применяют бумажную оплетку или трубки из бакелизованной бумаги. При напряжениях начиная с $3 \div 6$ kV, при пропускании отводов сквозь деревянные опорные рейки и т. п. ставят фарфоровые втулки для добавочной изоляции (см. чертеж III в приложении). Если (при больших токах) отводы выполняются в виде шин, то в месте присоединения последних к изоляторам ставят гибкие вставки из многих тонких медных полос (рис. 54) во избежание поломки изоляторов при присоединении шин или их тепловом расширении.

Среди отводов особое место занимает отвод нулевой точки; он обыкновенно рассчитывается на 25% линейного тока. На крышке нулевой изолятор располагается согласно ОСТ 2524 со стороны изолятора фазы А (или, соответственно, а).

Если обмотка высшего напряжения наматывается поверх обмотки низшего напряжения, надо обратить большое внимание на то, чтобы было правильно указано, на которую сторону должны быть выведены те или другие начала, концы и ответвления. Обычно все концы высшего напряжения выводят на одну сторону, а низшего — на другую. Для трехобмоточных трансформаторов вывод концов представляет серьезную задачу. Иногда — у низковольтных трансформаторов — делают одну клеммовую доску, и все концы обеих обмоток выводят на одну сторону (пример 2, § 111).

В. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБМОТОК РАЗНЫХ ТИПОВ

§ 45. Обмотки из цилиндрических катушек

Обмотки, состоящие из одной цилиндрической катушки (рис. 7а) в 1—3 слоя, являются одними из простейших. Форма — чаще круглая и реже прямоугольная.¹ Это типичные обмотки на напряжения до 500 В для трансформаторов мощностью примерно до 300 кВА с масляным и до 150 кВА с воздушным охлаждением.

Проектирование таких обмоток ведется в следующем порядке.

При предварительном расчете выбирается число цилиндрических поверхностей охлаждения катушки (§ 84); для трехфазных трансформаторов его можно брать из табл. 18.

Т а б л и ц а 18

Охлаждение	Мощность в киловольтамперах		
	До 100	До 300—400; иногда больше	
Масляное	До 100	До 300—400; иногда больше	
Воздушное	До 30	До 60	До 150
Число поверхностей охлаждения	2	3	4

Предварительным же расчетом (§ 109, п. 34) определяется и примерная длина катушки l_1 или l_2 . Остается определить число витков w (§ 38) и сечение витка S_w (§ 42), а затем путем проб проверить, во сколько слоев уложится число витков w . Имея в виду, что для размещения в окне w витков в один слой вдоль оси требуется $w + 1$ мест — например, на рис. 55 два

¹ При прямоугольном сечении стержней.

витка занимают три места — размер β_u витка с изоляцией определится так:

$$\beta_u = \frac{l_2}{(w_2 + 1) \cdot 1,03}, \quad (54)$$

если считать, что все витки поместятся в один слой (рис. 7 а); в формуле (54) l_2 и β_u — в миллиметрах, а коэффициентом 1,03 (иногда до 1,05) учитывают возможную неплотность намотки и стремление катушки спружинить после снятия ее с оправки.

Вычитая из β_u толщину изоляции δ_u , считаемую на обе стороны, получают размер β самого сечения: $\beta = \beta_u - \delta_u$.

Обращаясь к табл. 12, подбирают ближайший размер β для требуемого сечения S_m и одновременно размер α . После этого выбирают сорт и толщину изоляции (§ 63). Размеры (в миллиметрах) выбранного сечения провода без изоляции и с изоляцией обозначаются в виде условной дроби:

$$\frac{\alpha \times \beta}{\alpha_u \times \beta_u}.$$

Рис. 55. Место, занимаемое двумя витками цилиндрической катушки.

При большом сечении витка поступают, как указано в § 42. Если витки не укладываются в один слой, применяют двухслойные или (реже) трехслойные катушки. В зависимости от напряжения и размера катушек, а значит и от мощности трансфор-

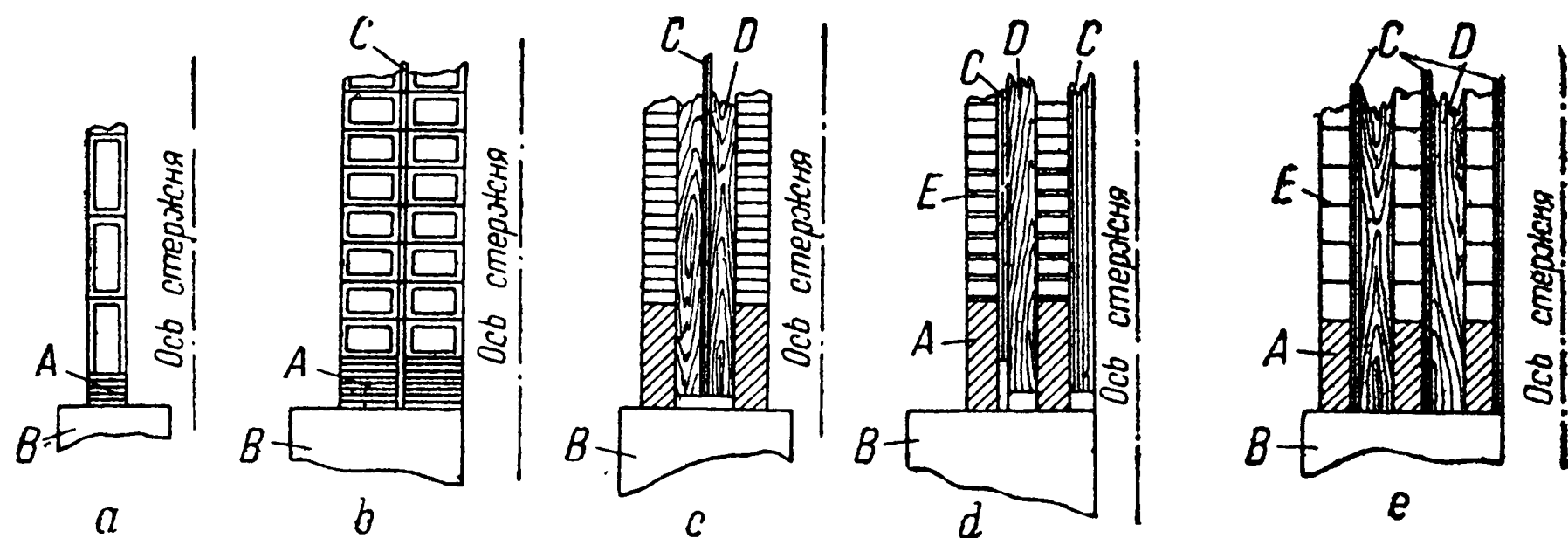


Рис. 56. Устройство цилиндрических катушек: а — катушка в один слой, намотка плашмя; б — намотка в два слоя „на ребро“; в — намотка в два слоя плашмя, с двумя каналами и гильзой между слоями; д — намотка плашмя в два слоя на цилиндр с каналом между слоями; е — намотка в три слоя с каналами. А — выравнивающий кольцевой клин; В — опора обмотки; С — цилиндр; D — рейка; E — добавочная изоляция крайних витков.

матора цилиндрические катушки получают различную конструкцию (рис. 56). Иногда, при небольшом напряжении между слоями (100 ÷ 200 V), между ними достаточно проложить гильзу из пресшпана 0,3 ÷ 0,5 mm (рис. 56b), иногда — для целей охлаждения — между слоями делаются каналы (подробно см. § 85).

Если между слоями напряжение составляет 1000 V и более, то кроме гильзы 2 mm делают 1÷2 канала (рис. 56с). Если сечение провода очень невелико, катушку для механической прочности наматывают на изолирующий цилиндр С (рис. 56d). Устройство трехслойной катушки показано на рис. 56e, однослойной — на рис. 56a.

При расчете витки стараются разместить плашмя (рис. 56a и e), но, если это не удастся, прибегают к размещению „на ребро“ (рис. 56b, c и d), что особо отмечается в расчетной записке. Без особых приспособлений „на ребро“ можно наматывать только круглые катушки и притом, если $\beta:\alpha$ не > 4 . Радиальный размер катушки следует согласовать с допустимым процентом добавочных потерь (§ 72) в зависимости от радиального размера провода и числа слоев. О связи между толщиной катушки и плотностью тока см. § 84.

Поскольку в цилиндрической катушке витки идут по винтовой линии, концы катушки стараются выравнять путем подмотки (рис. 56) из полосок пресшпана, имеющих форму клина, длина

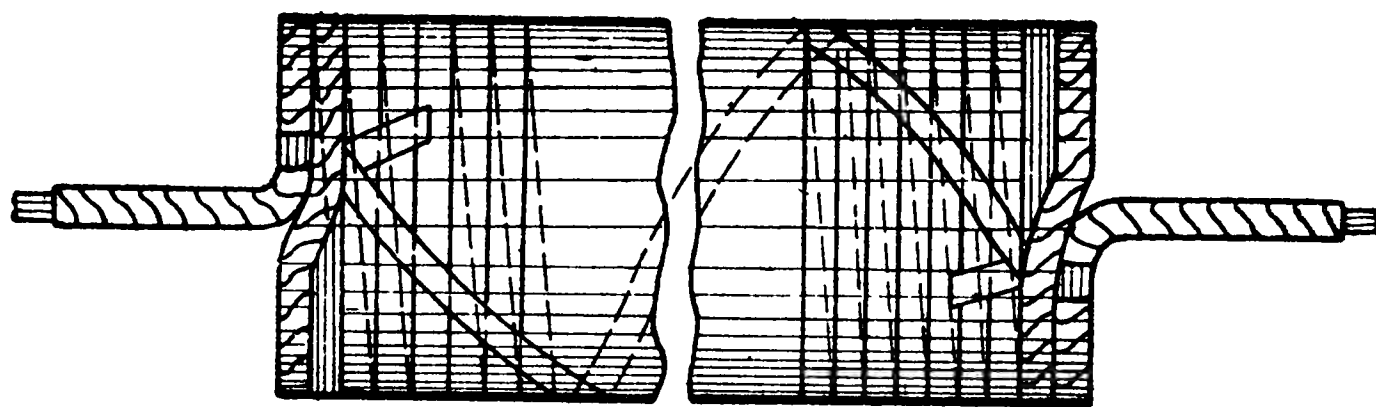


Рис. 57. Закрепление концов цилиндрической катушки.

которого равна длине витка, а высота — высоте витка плюс 3÷5 mm; толщина клина равна толщине витка с изоляцией. Иногда этот клин вырезается из цилиндра, изготовленного из бакелизованной бумаги и имеющего требуемый диаметр.

В катушках с 2÷3 слоями наружный слой удерживает внутреннее. Однослойные же катушки укрепляются киперной лентой, наматываемой на их боковую поверхность до снятия их с оправки. Закрепление концов цилиндрической катушки показано на рис. 57.

Цилиндрические катушки неприменимы для высоких напряжений из-за трудности изолировки слоев; недостаточна также и механическая прочность таких катушек в осевом направлении (подробно см. § 106). Поэтому в настоящее время, уже начиная с мощностей порядка 300 kVA, вместо цилиндрических катушек применяют винтовую обмотку (§ 49) или непрерывную (§ 48).

§ 46. Обмотки из простых дисковых катушек

Эта форма катушек — плоская спираль (рис. 7b) — является при прямоугольном сечении провода идеальной как с точки зрения охлаждения (каждый виток имеет свое собственное охлаж-

дение с одной или даже двух сторон), так и с точки зрения изоляции и возможности надежно опереть каждый виток („разгруженная“ от усилий обмотка, см. § 106). Поэтому конструкция обмотки из дисковых катушек получила наибольшее распространение для средних и мощных трансформаторов и применяется как для высоковольтных, так и для низковольтных обмоток.

У средних и мощных стержневых трансформаторов с concentрическими обмотками последние состоят из ряда дисковых катушек (см. чертеж IV в приложении). Виток может состоять из одного, двух или нескольких проводов, наложенных плашмя один на другой и наматываемых одновременно.

Для чередующихся обмоток стержневых и броневых трансформаторов дисковые катушки вообще являются естественной

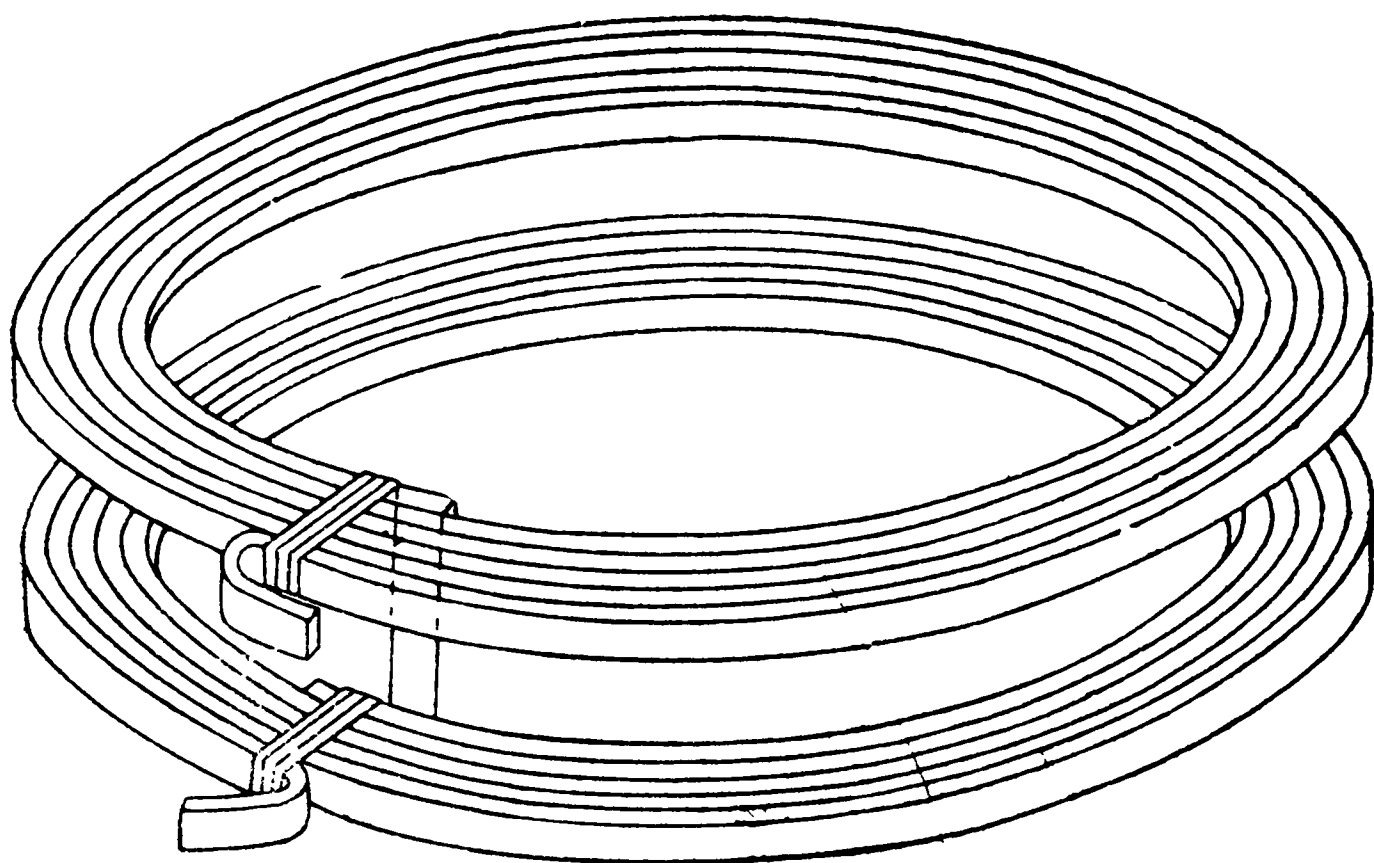


Рис. 58. Дисковая парная катушка.

формой выполнения. Если при этом катушки круглые, то виток может иметь любое отношение размеров, но для больших прямоугольных дисковых катушек броневых трансформаторов следует избегать применения витков, у которых радиальный размер превышает ширину более, чем в три раза, иначе катушка получается непрочной и может рассыпаться. В углах таких катушек обязательно прокладывается полоска пресшпана, служащая: 1) для улучшения изоляции витков, страдающей в этих местах от пробоев и от раздавливания при намотке, 2) для придания катушкам правильной формы.

Обмотка из круглых дисковых катушек может быть образована из одиночных или парных катушек, или же может быть намотана „непрерывно“, т. е. целым проводом — так называемая „непрерывная обмотка“ (§ 48).

Одиночные катушки применяются главным образом тогда, когда требуется вывод внутренних концов катушек. Чаще применяются катушки спаренные; при этом или все катушки нама-

тываются одинаково, а затем попарно складываются противоположными сторонами и соединяются внутренними концами так, чтобы образовалась непрерывная спираль (рис. 58), или особым приемом катушки наматываются сразу парными без спайки между катушками, составляющими пару [Л. 27, стр. 26].

Об изоляции дисковых катушек см. § 63; об охлаждении и выборе числа охлаждающих каналов см. § 84 и 85. Возможные варианты устройства обмотки из дисковых катушек см. рис. 123.

При выборе числа катушек можно руководствоваться следующими соображениями.

1. Напряжение, приходящееся на одну катушку, выбирается в пределах $400 \div 800 \text{ V}$.

2. Число катушек должно быть четным для возможности применять парные катушки с наружными соединениями между парами.

3. При одиночных или парных катушках число витков в каждой катушке должно быть целым, или же равняться целому числу с половиной, для того чтобы все места соединений между парами катушек пришлись по одной образующей цилиндра (рис. 59).

Расчет концентрических обмоток, состоящих из дисковых катушек, можно вести следующим путем. Если из предварительного расчета (§ 109, п. 34) известна примерная длина l_1 обмотки вдоль оси, надо выбрать число катушек, а также число каналов и изоляционных шайб, а затем, вычитая из общей длины обмотки место, занимаемое каналами и шайбами¹ (всего при наличии каналов обычно $40 \div 60\%$ высоты l_1 (или l_2) обмотки),

и разделяя остаток на число катушек, можно получить примерный осевой размер β_u провода с изоляцией. Выбрав (§ 60) толщину этой последней, можно определить и размер β самого провода. После этого по табл. 12 выбирается окончательно провод требуемого сечения с размерами (в миллиметрах):

$$\frac{\alpha \times \beta}{\alpha_u \times \beta_u} \cdot$$

Так как при намотке катушек витки могут немного взаимно сдвинуться вдоль оси катушки, то осевой размер последней получается на $0,2 \div 0,3 \text{ mm}$ больше размера β_u одиночного провода.

¹ При выборе схемы по рис. 52 нужно учесть еще место для изоляционного промежутка δ_p , или так называемого „разрыва“ в обмотке (§ 63).

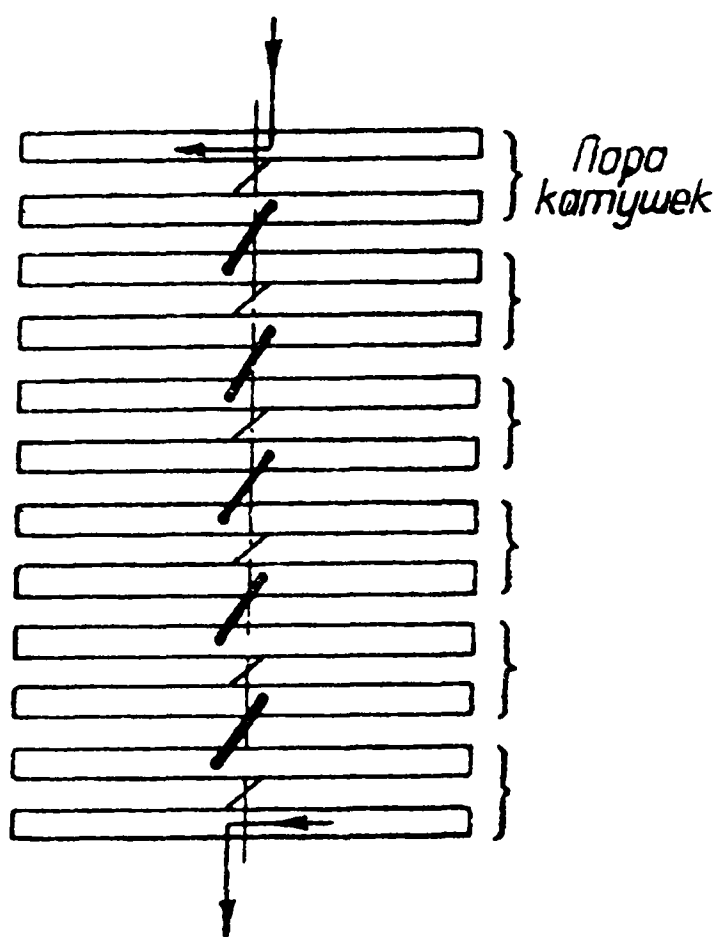


Рис. 59. Расположение соединений дисковых парных катушек.

Конструкция прямоугольной дисковой катушки с деталями устройства отвлечения показана на рис. 60.

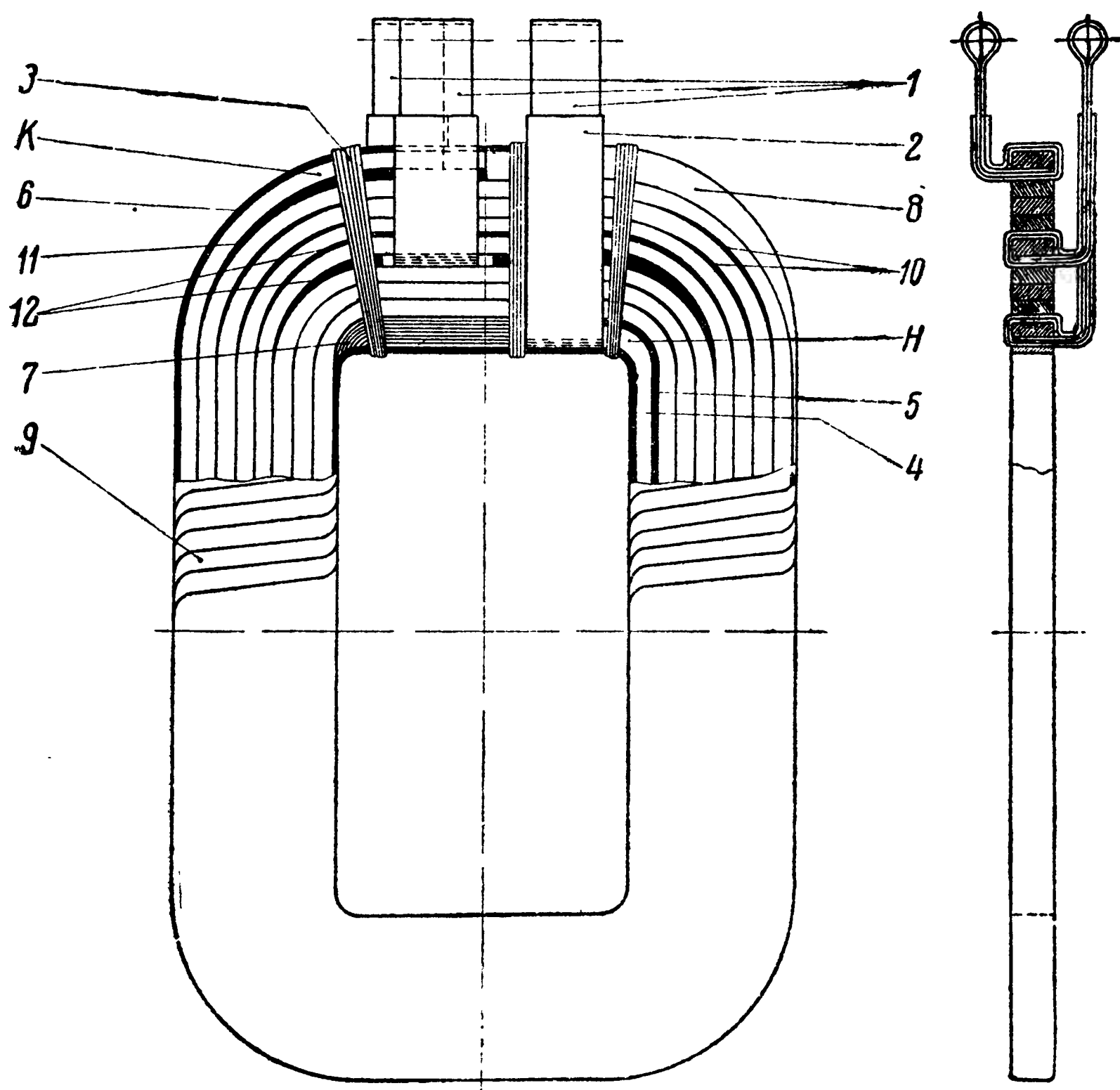


Рис. 60. Конструкция прямоугольной дисковой катушки с одним отвлечением для трансформатора с воздушным охлаждением.

H — начало катушки; *K* — конец катушки; 1 — вывода катушки; 2 — подкладка пресшпановая; 3 — бандаж из шпагата; 4 — гильза; 5 — подкладка под второй виток; 6 — наружная изоляция; 7 — подкладка для выравнивания; 8 — подкладка для выравнивания; 9 — лента киперная; 10 — подкладка на углах для изоляции и придания катушке правильной четырехугольной формы; 11 — подкладка под наружный конец; 12 — подкладка для выравнивания.

§ 47. Обмотки из многорядных дисковых катушек

Такие обмотки наматываются обыкновенно из круглого провода диаметром до 3 мм. Это — типичные обмотки высшего напряжения для трансформаторов небольшой мощности до 35 kV. Для трансформаторов до 150 kVA намотка катушек, разделяемых изоляционными шайбами *A* (рис. 61), производится прямо на цилиндр или гильзу *C*. Следует учесть, что катушки 1—2, 3—4 и т. д. наматываются попарно так, что спайки *B* между катушками одной пары делаются внутри (при намотке),¹ соеди-

¹ Намотка пары катушек производится в разные стороны.

нения же *D* между парами производятся снаружи при сборке трансформатора. В результате в местах *E* действует примерно э. д. с. пары катушек. Для увеличения пути разряда в этих местах применяют конструкцию по рис. 62 с подмоткой под катушки полоски пресшпана¹ или по рис. 61, где применяются

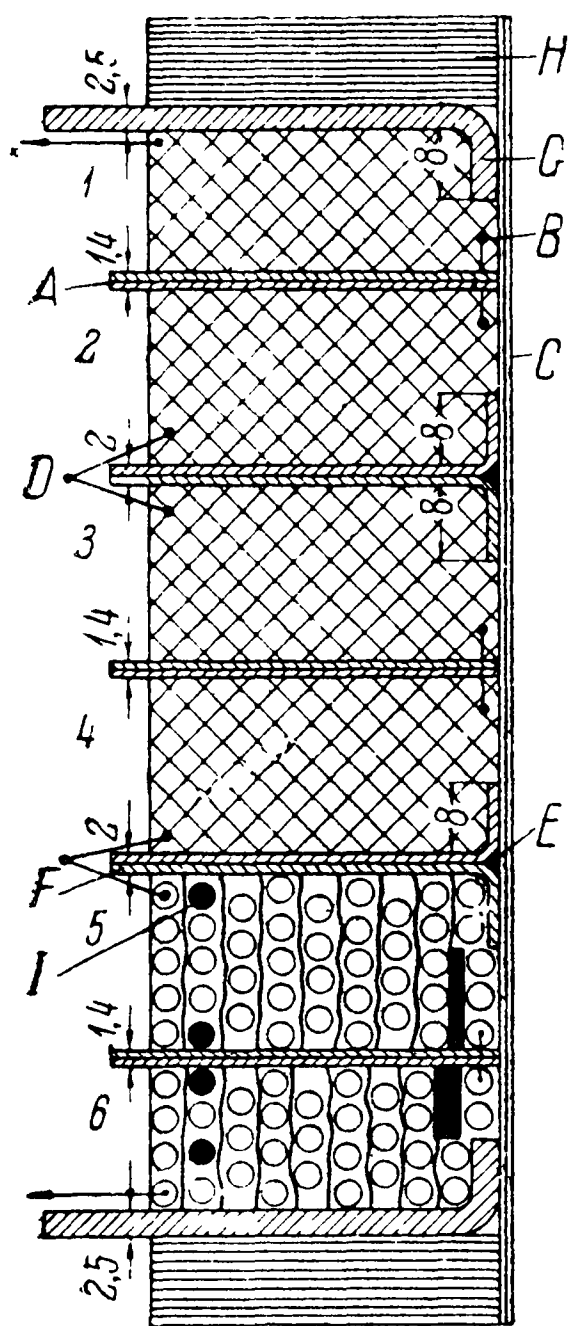


Рис. 61. Намотка многорядных дисковых катушек на изолирующий цилиндр: *A* — шайбы простые; *B* — место соединения катушек одной пары; *C* — цилиндр; *D* — место соединения пар катушек; *E* — усиленная изоляция в том месте, где действует напряжение двух катушек; *F* и *G* — шайбы угловые; *H* — ярмовая изоляция; *I* — фальшивые витки из шпагата для выравнивания наружной поверхности катушки.

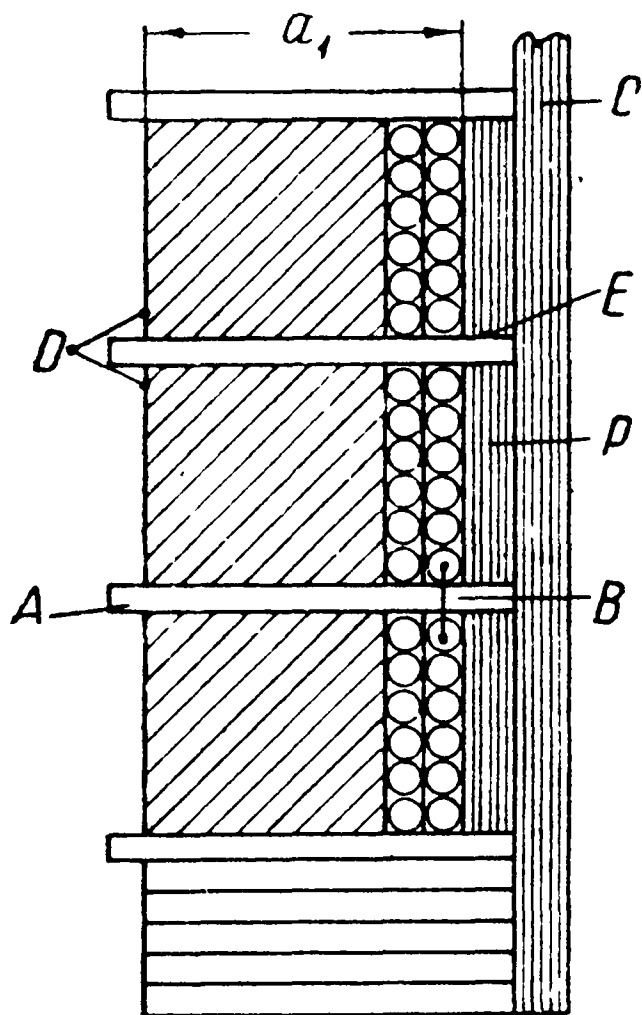


Рис. 62. То же, что на рис. 61, но с применением подмотки *P* из полоски пресшпана.

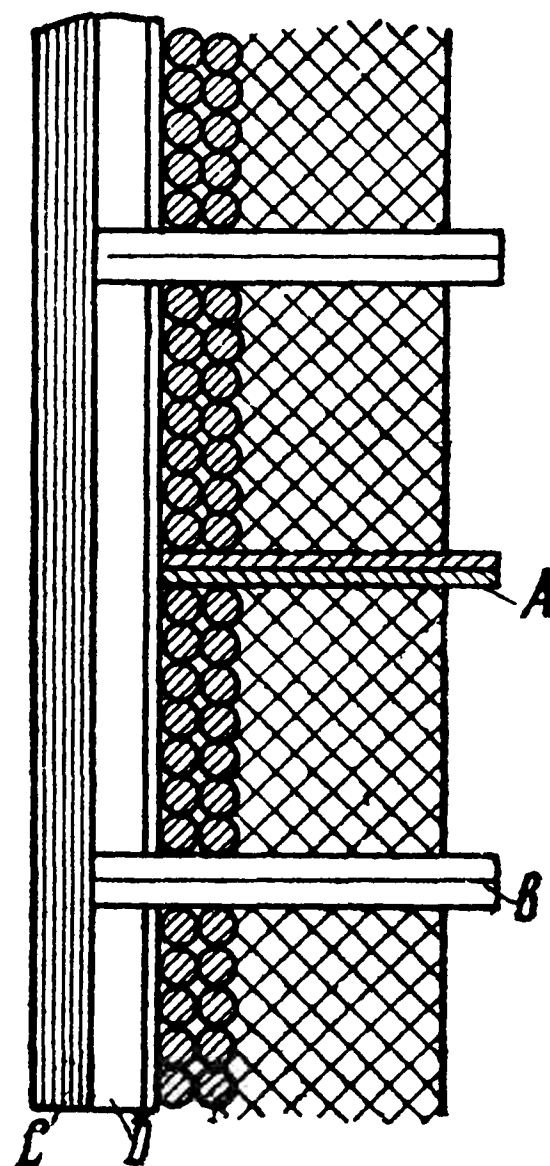


Рис. 63. Обмотка из многорядных дисковых катушек с каналами: *A* — шайбы; *B* — радиальные опоры, образующие каналы; *C* — цилиндр; *D* — продольная рейка.

шайбы простые *A* и угловые *F*, поочередно насаженные на цилиндр *C*. Для более мощных трансформаторов такие обмотки состояются из катушек, отдельно наматываемых на оправках (шаблонах); катушки насаживаются на цилиндр при сборке трансформатора. Между катушками оставляют каналы по данным теплового расчета (§ 84 и 85) и ставят иногда изолирующие шайбы — по данным расчета изоляции (§ 63); расположение катушек по рис. 63 или 64. На рис. 65 даны детали парной катушки.

¹ При этой конструкции несколько увеличивается средняя длина витка.

При расчете соблюдают следующие условия.

1. Напряжение на одну катушку выбирается в пределах $300 \div 500$ В; напряжение между двумя соседними слоями $30 \div 50$ В.

2. Число n' катушек на стержне должно быть четным.

3. Число витков в катушке — целое; оно может быть различным у разных катушек, в начальных обычно меньше, чем в остальных из-за более усиленной изоляции между слоями, а иногда и на самом проводе. Для высоких напряжений начальные катушки наматываются из круглого провода большего сечения, чем прочие катушки.

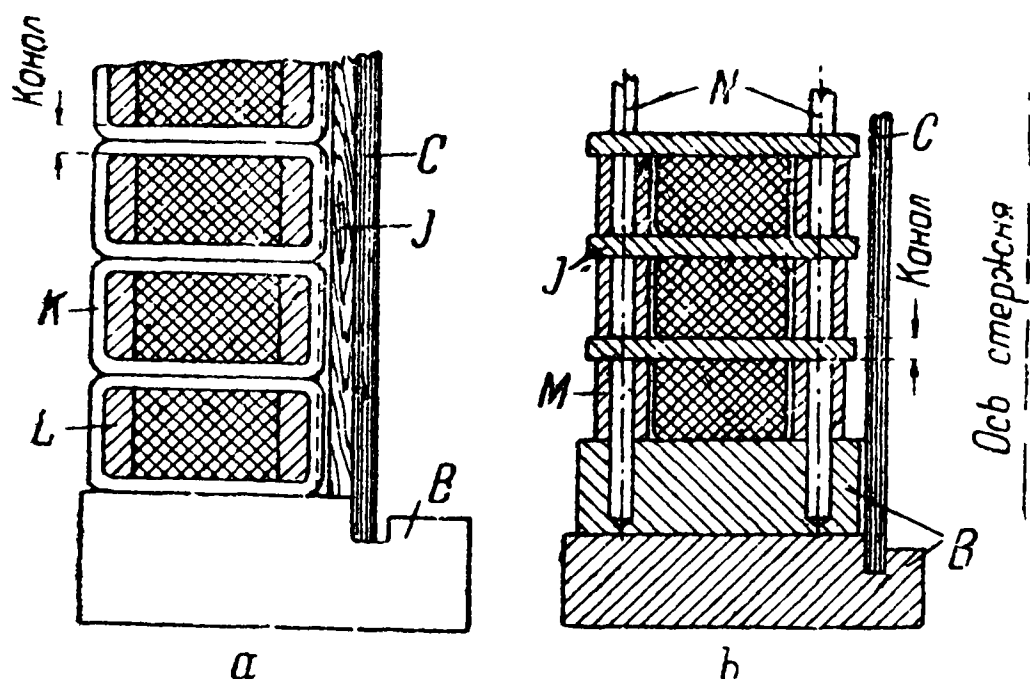


Рис. 64. Устройство «разгруженной» обмотки: В — опоры; С — цилиндр; J — рейка; К — бандаж из бакелизованной бумаги; L — разгружающие бруски; М — разгружающие трубки; N — круглые рейки.

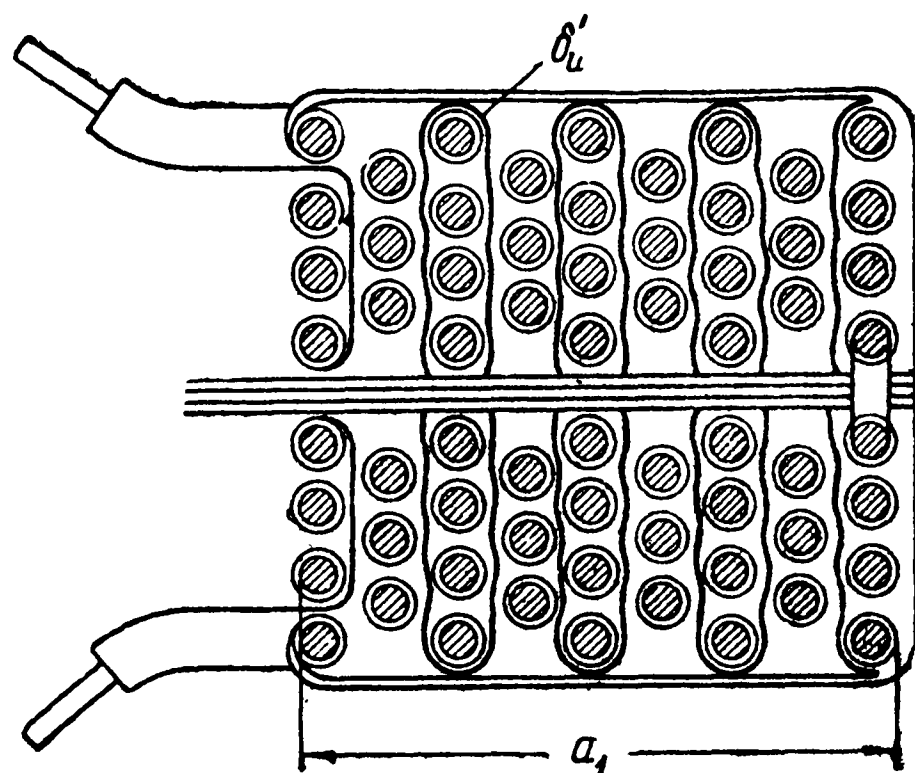


Рис. 65. Двойная многорядная катушка из круглого провода с добавочной изоляцией δ_u' между слоями.

Расчет ведется следующим образом. Предположим опять, что примерная осевая длина l_1 обмотки известна, и выбран диаметр α провода без изоляции и α_u с изоляцией. По общему правилу на каждую катушку потребуется в осевом направлении одно лишнее место против числа проводов в катушке в этом направлении (рис. 55). Поэтому вдоль оси будет потеряно столько мест, сколько катушек в обмотке. Если из длины l_1 обмотки вычесть место, занимаемое шайбами и каналами — если они есть — а также и величину $n' \cdot \alpha_u$, то остаток представит полезное место для обмотки.¹ Разделяя этот остаток на α_u , определим число проводов, которое может разместиться вдоль оси обмотки. На это число следует разделить полное число витков ψ_1 на стержне; частное укажет число слоев n_a в катушках в радиальном направлении. Полезно, когда оно получается числом смешанным, причем дробь $> 1/2$, что будет обозначать, что по расчету один слой остается незаполненным. Дело в том,

¹ См. сноску в § 46.

что при намотке всегда могут остаться витки, не поместившиеся в своем слое; тогда они заполнят наружный слой.

Число витков, разместившееся вдоль обмотки, распределяют на n' катушек с тем расчетом, чтобы иметь не более трех-четырех типов катушек, считая в том числе и начальные с усиленной изоляцией, имеющие обычно меньшее число витков, чем катушки промежуточные.

Для подсчета радиального размера a_1 катушек (рис. 62 и 65) нужно учесть еще толщину применяемых иногда прокладок между слоями $\delta'_u = 0,07 \div 0,2$ mm. Тогда:

$$a_1 \approx 0,9 \cdot n_a \cdot (a_u + \delta'_u). \quad (55)$$

Коэффициентом 0,9 учитывается уменьшение ширины катушки при шахматном (треугольном) расположении проводов в ней (рис. 61 и 65); при жестких прокладках и квадратном расположении проводов (рис. 62 и 63) коэффициент этот равен 1,0.

Следует отметить, что рассматриваемый тип намотки плохо подходит для прямоугольных катушек броневых трансформаторов; катушки получаются неровными и непрочными. Полезно также повторить сказанное в § 42 о недопустимости применения провода прямоугольного или квадратного сечения для многорядных катушек.

§ 48. Непрерывные обмотки

Такие обмотки состоят из дисковых катушек, намотанных из прямоугольного провода, с каналами между парами катушек или между всеми катушками. Благодаря специальному приему — перекладыванию витков каждой нечетной катушки сразу после ее намотки так, чтобы верхний виток пришелся вниз, а нижний наверху [Л. 28, стр. 52] — удается намотать обмотку одного стержня целиком без спаек не только между отдельными катушками, но и между парами их. Намотка ведется на изолирующий цилиндр, поверх реек, наложенных по его поверхности. Имея в виду, что у большого трансформатора может быть до 100 катушек (50 пар) на стержне, потребовалось бы при сборке парных катушек произвести соединение и спайку в 50 местах. Каждое такое соединение может явиться слабым местом в обмотке как с точки зрения проводимости, так и с точки зрения нарушения однородности изоляции. Поэтому таких мест следует избегать; это и дает применение „непрерывной“ обмотки. Одновременно сокращается работа сборочного цеха, получающего готовую обмотку на целую фазу (стержень); площадь этого цеха лучше используется.

Непрерывная обмотка имеет еще то преимущество, что число витков в отдельных катушках может быть целым с дробью, знаменатель которой должен быть равен числу радиальных прокладок — опор C (рис. 50) между катушками D , так как переход из одной катушки в другую делается всегда между

двумя опорами. Например, при 12 прокладках число витков в каждой из катушек может составлять $6\frac{5}{12}$, $8\frac{11}{12}$ и т. п. Благодаря этому упрощается подбор числа катушек при данном числе витков, но зато возникает связь между числом прокладок, числом витков обмотки и числом витков в каждой катушке. В остальном расчет такой обмотки ничем не отличается от расчета обмотки из дисковых катушек. Непрерывная намотка применима лишь при концентрическом расположении обмоток, преимущественно как высоковольтная обмотка средних и мощных трансформаторов.

По своему внешнему виду непрерывная обмотка вполне напоминает обычную обмотку из дисковых катушек на целую фазу (стержень) с той лишь разницей, что нигде нет спаек, и наружные переходы из катушки в катушку распределены по винтовой линии по всей наружной поверхности обмотки. Виток непрерывной обмотки может состоять из двух или большего числа проводов, причем тогда устраивается транспозиция этих проводов в разных местах обмотки по определенному правилу (§ 49).

§ 49. Винтовые обмотки

Определение см. § 2, п. 25а. Эти обмотки иногда называют также спиральными, что неправильно, ибо спираль представляет плоскую кривую. Винтовые обмотки применяются теперь очень часто в качестве обмоток низшего напряжения мощных и средних стержневых трансформаторов; они вытеснили обмотки цилиндрические.

Виток простой винтовой обмотки состоит из четного числа параллельных изолированных проводов прямоугольного сечения. Для возможности соединения их по концам параллельно без больших добавочных потерь производят при намотке транспозицию (перестановку) проводов в витках. Этим выравнивают активные и реактивные сопротивления отдельных проводов на всем протяжении обмотки и сильно уменьшают добавочные потери (§ 72).

Транспозиции выполняются различными способами. По одному из них, вся обмотка разбивается на $\frac{1}{2} + (n_a - 1) + \frac{1}{2} = n_a$ частей, где n_a — число проводов в витке; в каждом из n_a мест производится перевод верхнего провода одного витка в низ следующего витка (рис. 66). Повторяется это столько раз, чтобы каждый провод побывал во всех возможных положениях в витке на протяжении всей обмотки и вернулся потом на свое прежнее место.

Поскольку транспозиция всегда производится между радиальными прокладками (опорами), между числом витков w обмотки,

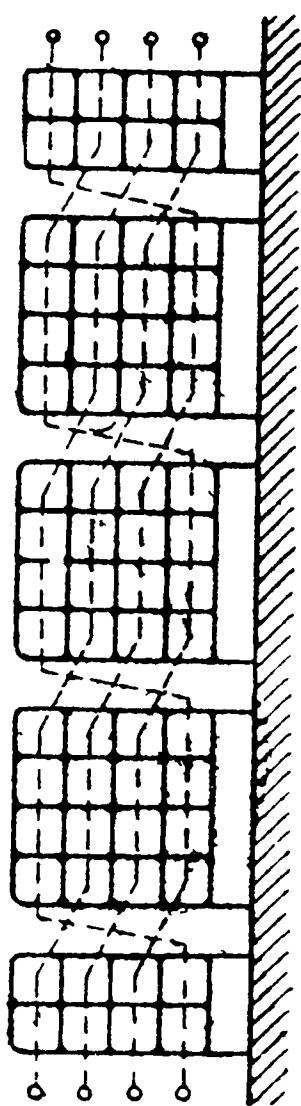


Рис. 66. Устройство „совершенной“ транспозиции.

числом проводов n_a в витке и числом опор N имеет место определенная зависимость, а именно:

$$\frac{w \cdot N}{n_a} = k. \quad (56)$$

N — всегда число четное; желательно, чтобы k было таким же; k — число участков витка между двумя транспозициями, а $\frac{k}{2}$ — число участков от начала обмотки до первой транспозиции и после последней транспозиции до конца обмотки.

По другому способу на всей длине обмотки применяют всего три транспозиции (рис. 67). Транспозицию *I* называют иногда „стандартной“, а транспозицию *II* — „специальной“. Транспозиция по рис. 66 является „совершенной“, а по рис. 67 при $n_a > 4$ — „несовершенной“, так как при этом остаются небольшие добавочные потери от „несовершенства транспозиции“; зато устройство по рис. 67 проще.

Для выполнения всякой транспозиции требуется вдоль оси место, равное ширине канала плюс осевой размер витка, что не следует забывать при подсчете осевой длины такой обмотки (пример 3, § 112).

Двойная винтовая обмотка (определение см. § 2, п. 25а) применяется при очень больших токах, когда нельзя обойтись простой винтовой обмоткой. В двойной винтовой обмотке можно произвести транспозицию по способу Хобарта (Hobart) без потери места вдоль оси; при этом половина витка может со-

стоять из любого, а не только четного, числа проводов. Порядок транспозиции Хобарта в витке из 2×7 проводов указан на рис. 68.¹ Пусть при этом число витков обмотки $w = 11$, а число радиальных опор 8. Для того чтобы каждый из проводов, составляющих виток, заняв при перестановках все возможные положения в витке, вернулся на свое место, нужно произвести 14 транспозиций. При 8 опорах для этого имеется $11 \cdot 8 = 88$ участков (частей витка). 14 мест транспозиции разделят всю обмотку на 15 частей. Между двумя транспозициями придется $\frac{88}{15} =$

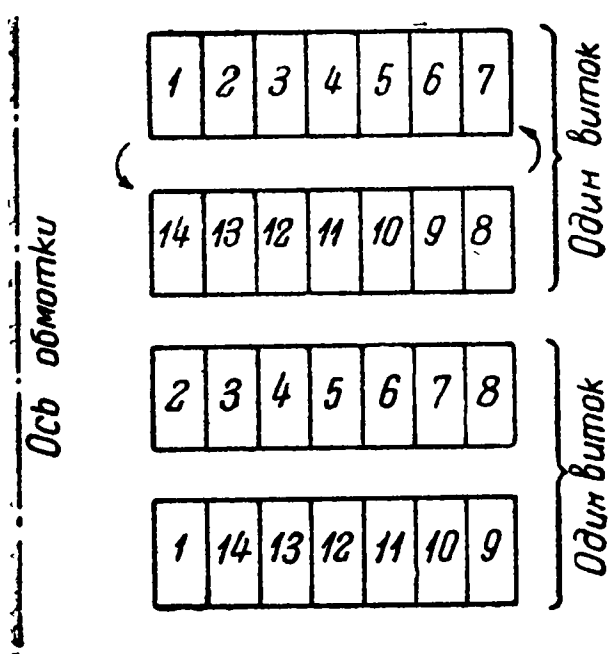


Рис. 68. Транспозиция Хобарта.

$= 5 \frac{13}{15}$ участка, т. е. восьмой доли витка. Округляя до

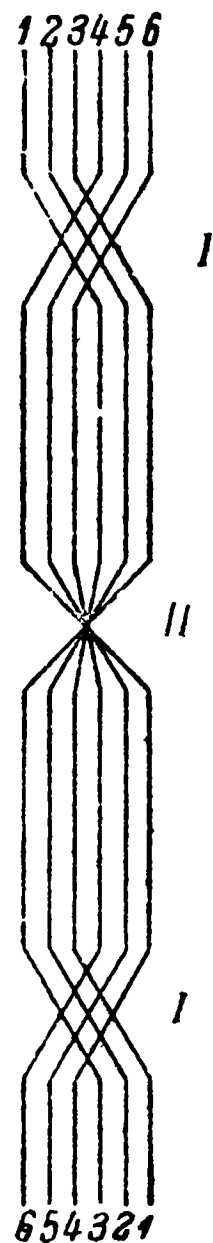


Рис. 67. Устройство американской „несовершенной“ (упрощенной) транспозиции.

¹ Эта транспозиция будет вполне совершенной тогда, когда на протяжении обмотки провода, составляющие виток, переложены дважды — один раз в одном направлении, другой раз в обратном.

целого числа этих долей, транспозицию делают через каждые $\frac{6}{8}$ витка. Тогда все 13 промежуточных участков займут $13 \cdot \frac{6}{8} = \frac{78}{8}$ витка, а два крайних займут по $\frac{1}{2} (\frac{88}{8} - \frac{78}{8}) = \frac{5}{8}$ витка.

Поскольку радиальный размер винтовых обмоток редко превосходит $30 \div 50$ мм, канал между витками достаточно брать размером $5 \div 8$ мм.

При небольшом ($5 \div 7$ мм) осевом размере β провода, составляющего виток, у простых винтовых обмоток можно делать каналы через каждые два витка, ограничиваясь в остальных местах прокладкой двух разрезных шайб из пресшпана; вопрос о числе каналов решается тепловым расчетом (§ 84 и 85).

§ 50. Специальные обмотки для очень больших токов

При весьма больших токах — тысячи и десятки тысяч ампер — и обычно малом при этом числе витков обмотки, становятся неприменимыми и винтовые обмотки; приходится прибегать к специальным конструкциям.

При концентрическом расположении обмоток виток на очень большие токи можно составить (рис. 69) из многих медных полос (лент), причем из-за трудности устройства отводов такую низковольтную обмотку приходится располагать снаружи; из-за невозможности устройства транспозиции в такой обмотке размер a_2 нельзя брать больше $12 \div 15$ мм во избежание чрезмерных добавочных потерь.

При чередующихся обмотках можно делать много параллельных групп в обмотке низшего напряжения с $1 \div 2$ витками в каждой группе. При этом виток подобен витку винтовой обмотки, т. е. состоит из многих (иногда до 40) голых или изолированных проводов; никакой транспозиции проводов при этом делать не нужно, ибо потоки рассеяния при чередующихся обмотках направлены радиально (§ 53), и больших добавочных потерь в обмотке не будет.

Для броневых трансформаторов витки на очень большие токи получают путем вырезания витка из листа электролитической меди требуемой толщины (рис. 70).

В обмотках из голой меди, ввиду благоприятных условий их охлаждения, можно брать повышенную (на $20 \div 30\%$) плотность тока, но во избежание быстрой порчи масла (§ 58) все голые обмотки и шины должны быть надежно покрыты маслоупорным лаком.

В специальных низковольтных трансформаторах, например сварочных с воздушным охлаждением, вторичный виток делается литым из меди или алюминия с залитой внутрь стальной труб-

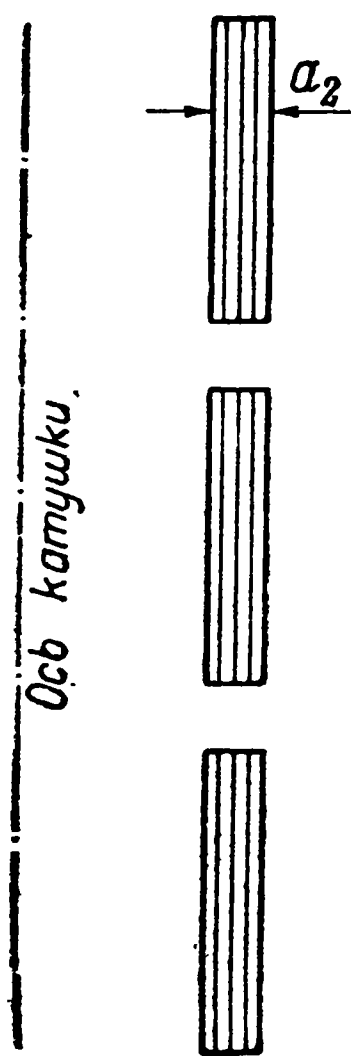


Рис. 69. Витки из многих голых лент для больших токов.

кой для водяного охлаждения; обмотка высшего напряжения тогда отдает свое тепло путем теплопроводности литому вторичному витку, а сердечник трансформатора — воздуху.

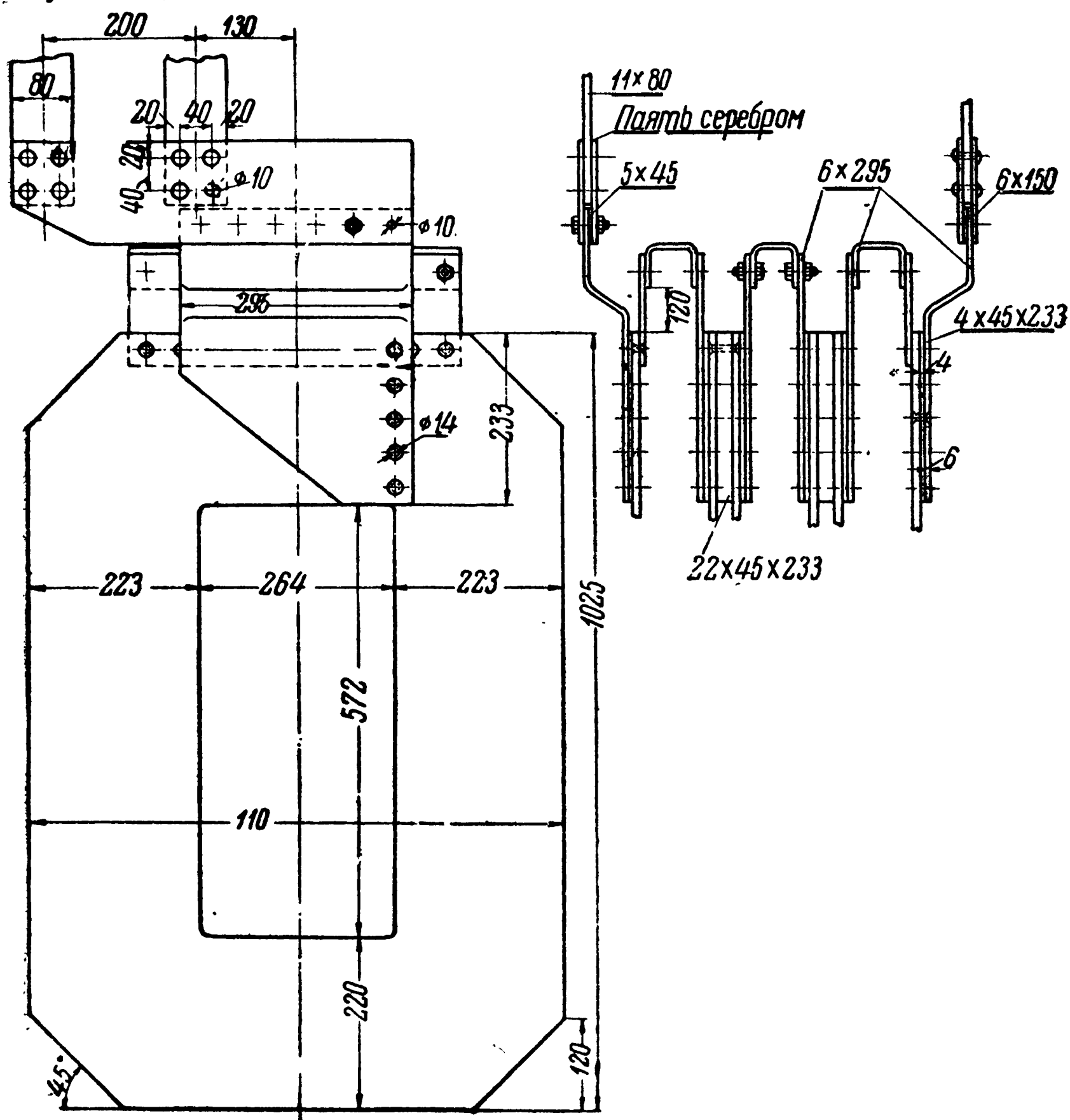


Рис. 70. Витки из листовой меди для больших токов.

§ 51. Специальные обмотки для весьма высоких напряжений

Поскольку проектирование таких обмоток не укладывается в рамки этой книги, им можно посвятить лишь несколько слов. При устройстве большинства их стремятся упростить изоляцию линейного конца обмотки, а также изоляцию обмотки от ярма. При схеме по рис. 71а линия L подводится к середине первого стержня; крайние к яру катушки этого стержня находятся примерно под половинным напряжением относительно земли по сравнению с обычным выполнением по рис. 71б.

При применении схемы по рис. 72, с попеременным зигзагообразным соединением пар катушек обеих стержней (обмотка в две параллельных ветви), крайние к ярмам катушки имеют потенциал нулевой точки. Стремление к усиленной изоляции

групп катушек вблизи начала обмотки приводит к конструкции обмотки высшего напряжения, именуемой по английски *boxed type*, что значит „заключенный в коробку“ (рис. 73). При этом одновременно уменьшается индуктивность всей обмотки, так

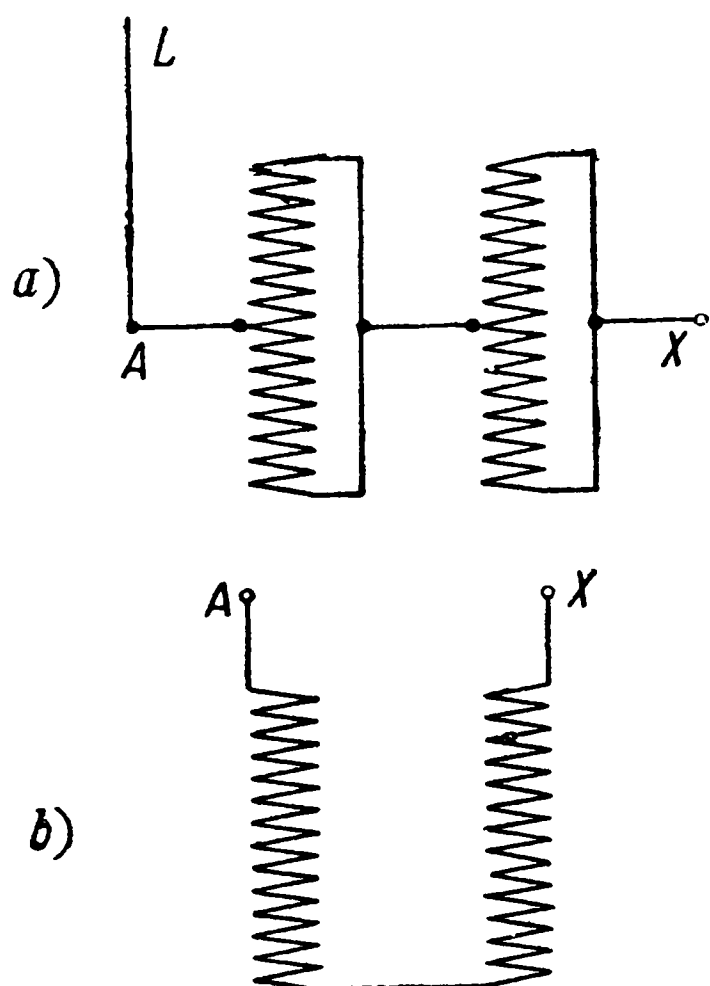


Рис. 71. *a* — соединение высоковольтной обмотки двух стержней по сравнению с *b* — обычным соединением. *L* — линия.

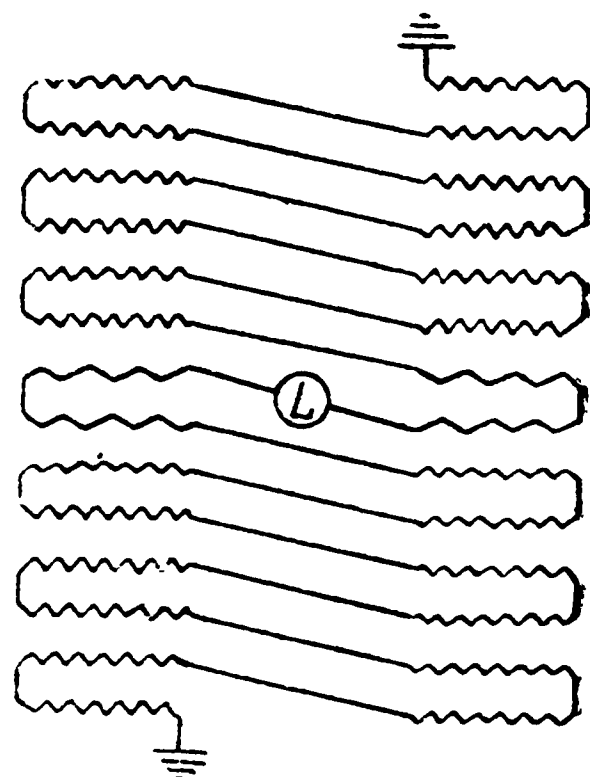


Рис. 72. Зигзагообразное соединение пар катушек двух стержней.

как по концам обмотки между собой сближены, тогда как в середине высоты они удалены на полное изоляционное расстояние. Неудобство таких обмоток заключается в том, что вну-

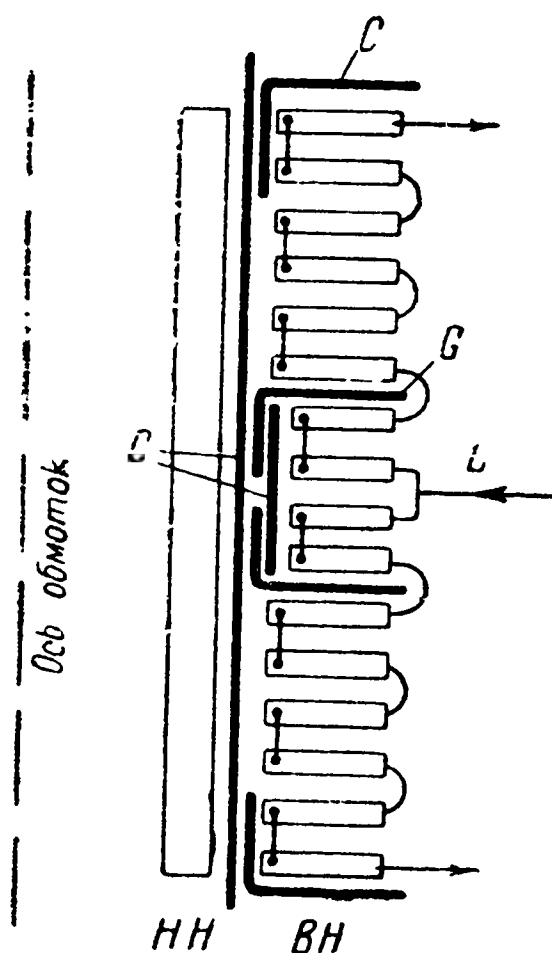


Рис. 73. Американская конструкция высоковольтной обмотки однофазного трансформатора: ВН — обмотка высшего напряжения; НН — обмотка низшего напряжения; *C* — цилиндры; *G* — угловые шайбы; *L* — линия.

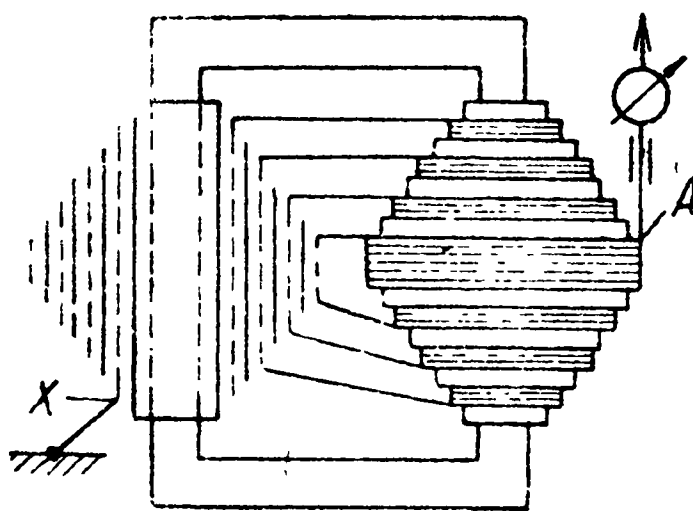


Рис. 74. Намотка высоковольтной обмотки по принципу цилиндрического конденсатора.

ртенний диаметр получается различным у разных катушек, и нельзя применить непрерывной обмотки.

По совсем иному принципу построены обмотки некоторых испытательных трансформаторов на весьма высокие напряжения. Обмотка из круглого провода расположена на обоих стержнях на ряде концентрических цилиндров, в один слой на каждом. Все слои соединены последовательно (рис. 74) так, что за первым слоем первого цилиндра идет первый слой второго, затем — второй слой первого и т. д. Нарастание потенциала идет постепенно от заземленного конца X к началу A . А так как совокупность цилиндров составляет ряд цилиндрических конденсаторов, и числа витков в слоях подсчитаны так, чтобы распределение потенциала по емкостям соответствовало распределению по последовательно соединенным виткам, то получается род „естественного распределения“ потенциалов, сообщаящего конструкции большую электрическую прочность.

С. РАЗЛИЧНЫЕ РАСЧЕТЫ, КАСАЮЩИЕСЯ ОБМОТОК

§ 52. Подсчет веса обмоток

Подсчет ведется по формуле:

$$G_m = m \cdot w \cdot l_w \cdot S_m \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг}, \quad (57)$$

где l_w — средняя длина витка в метрах, а S_m — сечение в кв. миллиметрах.

При этом нужно иметь в виду следующее.

1. Если регулировка числа витков не выходит из пределов $\pm 5\%$ или $\pm 2 \cdot 2^{1/2}\%$, то вес меди вычисляют для среднего числа витков, и по этому весу определяют потери (§ 71); если пределы регулировки больше, то вес и потери определяются для всех ступеней регулировки.

2. Кроме того, по наибольшему числу витков определяется общий конструктивный вес меди, в который входит и вес изоляции. Считая удельный вес изоляции равным 0,6, надбавку g_u (в процентах) на вес изоляции при толщине последней δ_u mm на обе стороны можно выразить так. Для круглого провода диаметром α mm:

$$g_u = 12 \left[2 \frac{\delta_u}{\alpha} + \left(\frac{\delta_u}{\alpha} \right)^2 \right] \%, \quad (58)$$

Для прямоугольного — с размерами α и β mm:

$$g_u = 12 \cdot \delta_u \cdot \frac{\alpha + \beta + 0,78 \delta_u}{S_m} \%, \quad (59)$$

где S_m — в кв. миллиметрах.

Величина g_u колеблется в пределах $2 \div 20\%$ для обычных сечений провода силовых трансформаторов и толщины изоляции $\delta_u = 0,5 \text{ mm} \div 3,0 \text{ mm}$ (считая на обе стороны). Кривая рис. 75 дает процентное значение веса изоляции для круглого провода в зависимости

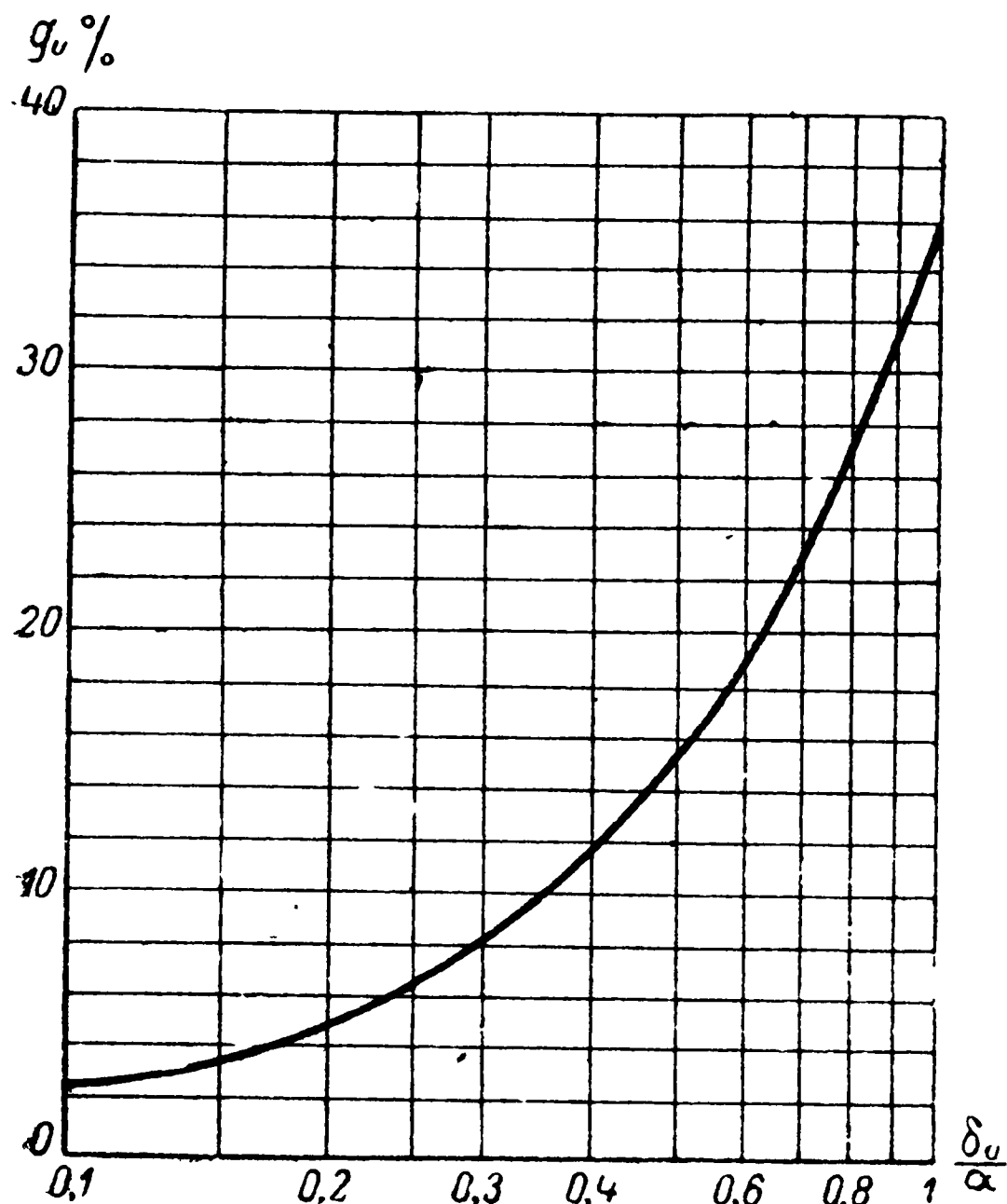


Рис. 75. Относительный вес изоляции в процентах при разных относительных толщинах изоляции на круглом проводе.

от отношения $\frac{\delta_u}{\alpha}$ по формуле (58).

3. При заказе провода приходится делать еще надбавку на возможное небольшое увеличение диаметра катушек, на концы, отрезаемые при сборке и спайке обмотки, и т. д. Чем меньше число изготавливаемых трансформаторов и чем меньше число витков в катушке, тем больше приходится делать эту надбавку (примерно в пределах $3 \div 10\%$).

§ 53. Подсчет индуктивности симметричных и несимметричных обмоток

Общую индуктивность трансформатора можно характеризовать или величиной полного фазного индуктивного сопротивления при коротком замыкании: $x_k = x_1 + x_2' = x_1 + x_2 \cdot k_{12}^2$, приведенного к обмотке (1),¹ или же величиной процентного значения э. д. с. рассеяния:

$$e_s = \frac{x_k \cdot I_\phi \cdot 100}{E_\phi} \% \quad (60)$$

Индуктивность зависит от конструкции и взаимного расположения обмоток и для разных обмоток подсчитывается по разным методам.

Прежде чем приступить к расчету, надо уяснить себе, пользуясь законами магнитного поля, картину общего поля рассеяния вокруг обмоток трансформатора, для того чтобы сознательно пользоваться приводимыми формулами. Нужно уяснить себе, что картина поля рассеяния будет различной для частей обмоток, помещающихся в окне трансформатора и вне окна; что в окне трехфазного стержневого трансформатора, вмещающем обмотки

¹ Или $x_2 + x_1 \left(\frac{1}{k_{12}} \right)^2 = x_2 + x_1 \cdot k_{21}^2$ в случае приведения к обмотке (2).

двух фаз, мгновенные картины полей рассеяния будут иными, чем в окне однофазного трансформатора; что наличие или отсутствие бака влияет на поля рассеяния и т. д. На эти подробности надо обращать внимание, так как часто даже в основных руководствах этому вопросу не уделяется достаточно места, а иногда попадают и большие неточности.¹ Поэтому будет нелишним привести примерные картины поля рассеяния для симметричных (рис. 76 *a*) и несимметричных (рис. 76 *b*) concentрических обмоток стержневого трансформатора [Л. 87, фиг. 102]; изображена четверть окна. Что касается симметричных (§ 2, п. 27) обмоток, то для них картина поля рассеяния представляется проще, и ее исследование в элементарном виде приводится во всех пособиях по трансформаторам; классическими работами являются работы Каппа [Л. 88] и Роговского [Л. 89];² см. также [Л. 90—99].

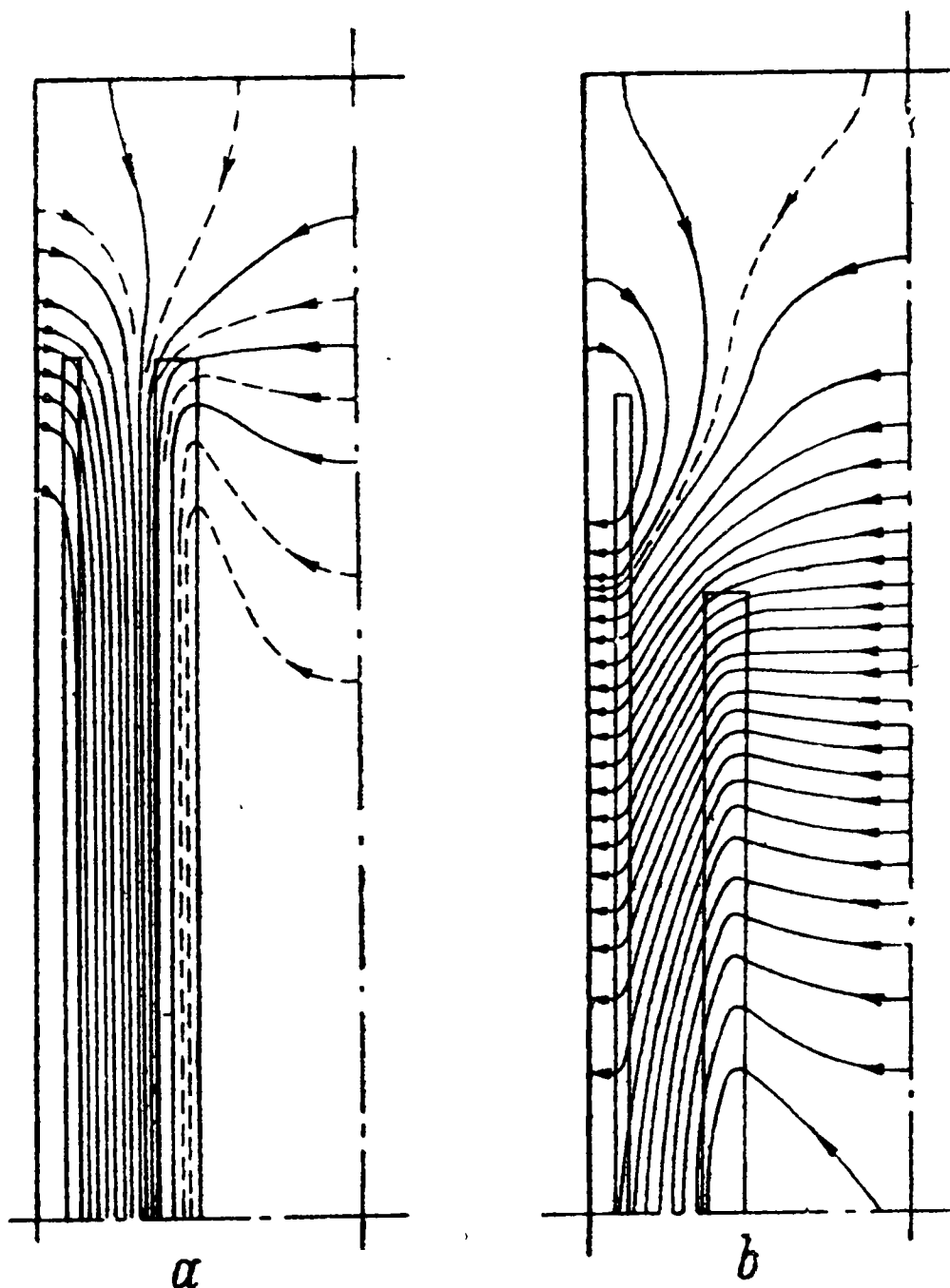


Рис. 76. Картина полей рассеяния concentрических обмоток: *a* — симметричных; *b* — несимметричных.

Для несимметричных обмоток картина поля рассеяния получается зачастую очень сложной, а формулы, приводимые в обширной литературе этого вопроса, дают в разных случаях результаты, мало сходные между собой. Общий вопрос о рассеянии любых обмоток трансформаторов наиболее подробно разработан в книге проф. Г. Н. Петрова [Л. 1, гл. IX] и в его статьях [Л. 100—102]. Ниже приведены без вывода значения величины $e_s\%$ для разных типов обмоток.

¹ Несмотря, например, на то, что еще в 1929 г. Хэгом (B. Hague) [Л. 87] было указано на ошибочность картины поля, приведенной еще у Арнольда [Л. 11, фиг. 19; Л. 11а, фиг. 24] и вошедшей затем в большинство руководств, все еще в отдельных книгах и, что хуже, в учебниках продолжает приводиться эта картина, совершенно не соответствующая действительности, в особенности для части поля рассеяния вокруг внешней обмотки в окне трансформатора. Правильную картину см. рис. 76.

² Эта работа [Л. 89], положенная в основу всех последующих исследований рассеяния в трансформаторах, является в настоящее время библиографической редкостью не только в СССР, но и за границей: главные выводы можно найти в работе [Л. 91] на английском языке.

1. Симметричные обмотки. Для обмоток простых concentрических (рис. 77a) и неразделенных чередующихся (рис. 77b), не имеющих каналов в каждой обмотке:

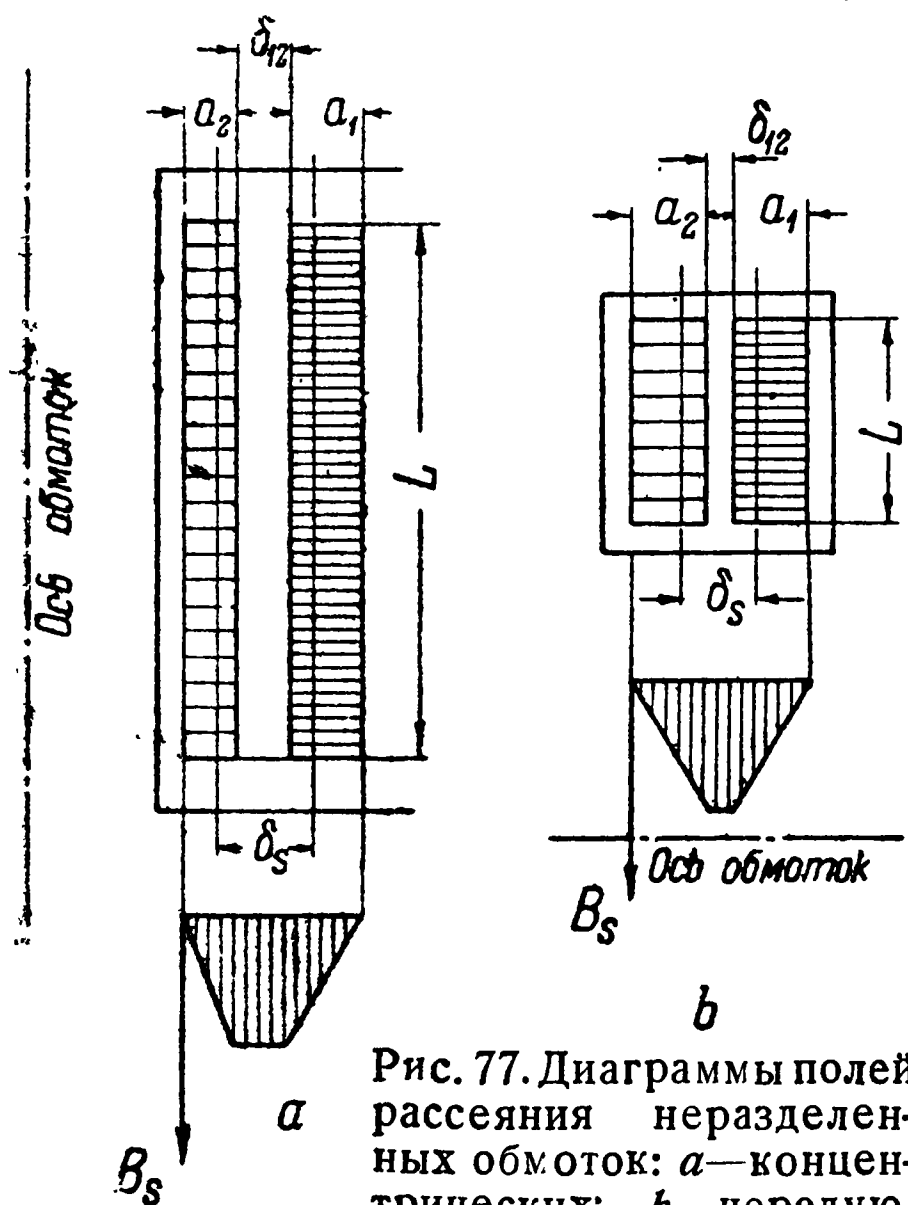


Рис. 77. Диаграммы полей рассеяния неразделенных обмоток: а—концентрических; б—чередующихся.

$$e_s = \frac{8 \cdot f \cdot I_\phi \cdot w^2 \cdot 10^{-6} \cdot l_w \cdot \delta_s}{E_\phi \cdot l_s} = \frac{8 \cdot f \cdot P_\phi \cdot 10^{-3} \cdot l_w \cdot \delta_s}{e_w^2 \cdot l_s} \% \quad (61)$$

Здесь: P_ϕ —мощность в киловольтамперах, приходящаяся на одну фазу трехфазного трансформатора или один стержень однофазного, l_s —средняя длина магнитных линий потоков рассеяния, причем $l_s = \frac{L}{K_R}$, где K_R —коэффициент Роговского, равный:

$$K_R = 1 - \sigma \left(1 - e^{\frac{1}{\sigma}}\right).$$

Если

$$\sigma = \frac{\delta_{12} + a_1 + a_2}{\pi \cdot L}$$

— величина сравнительно небольшая, как это обычно и бывает,

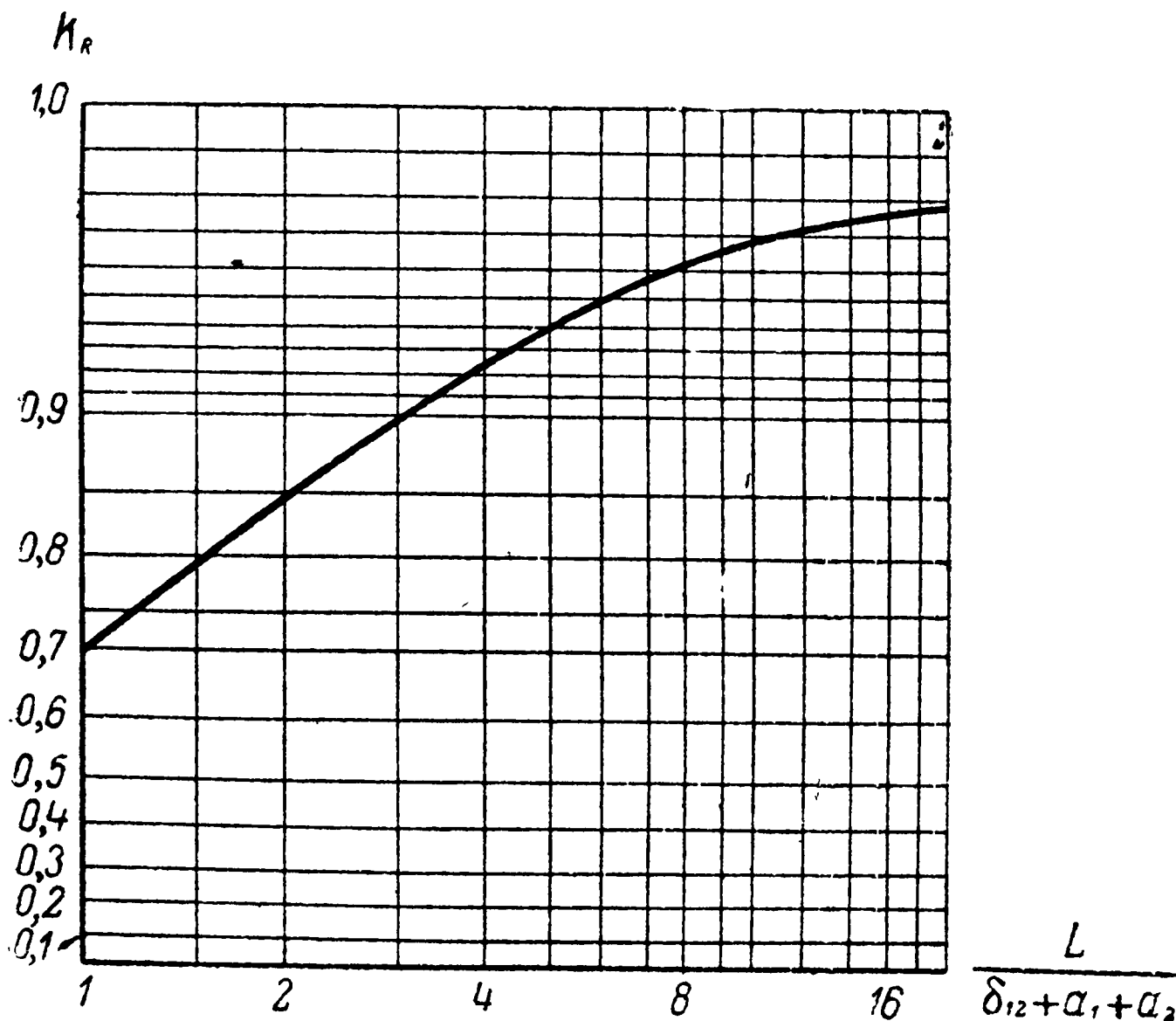


Рис. 78. Значение коэффициента Роговского K_R .

то коэффициент K_R выражается более просто, а именно:

$$K_R = 1 - \sigma = 1 - \frac{\delta_{12} + a_1 + a_2}{\pi \cdot L}. \quad (62)$$

Величину K_R можно брать из кривой рис. 78 по вычисленному отношению:

$$\frac{L}{\delta_{12} + a_1 + a_2}.$$

Что касается приведенного расстояния δ_s между обмотками, то оно выражается, как известно, следующим образом:

$$\delta_s = \delta_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}, \quad (63)$$

где a_1 и a_2 — размеры обмоток, перпендикулярные потоку рассеяния Φ_s . Все размеры в формулах (61—63) — в сантиметрах; размеры a_1 и a_2 — без изоляции, δ_{12} — с изоляцией (рис. 79).

Всякое подразделение обмоток (1) и (2) с чередованием частей их в осевом или радиальном направлении снижает индуктивность; она обратно пропорциональна удвоенному числу p

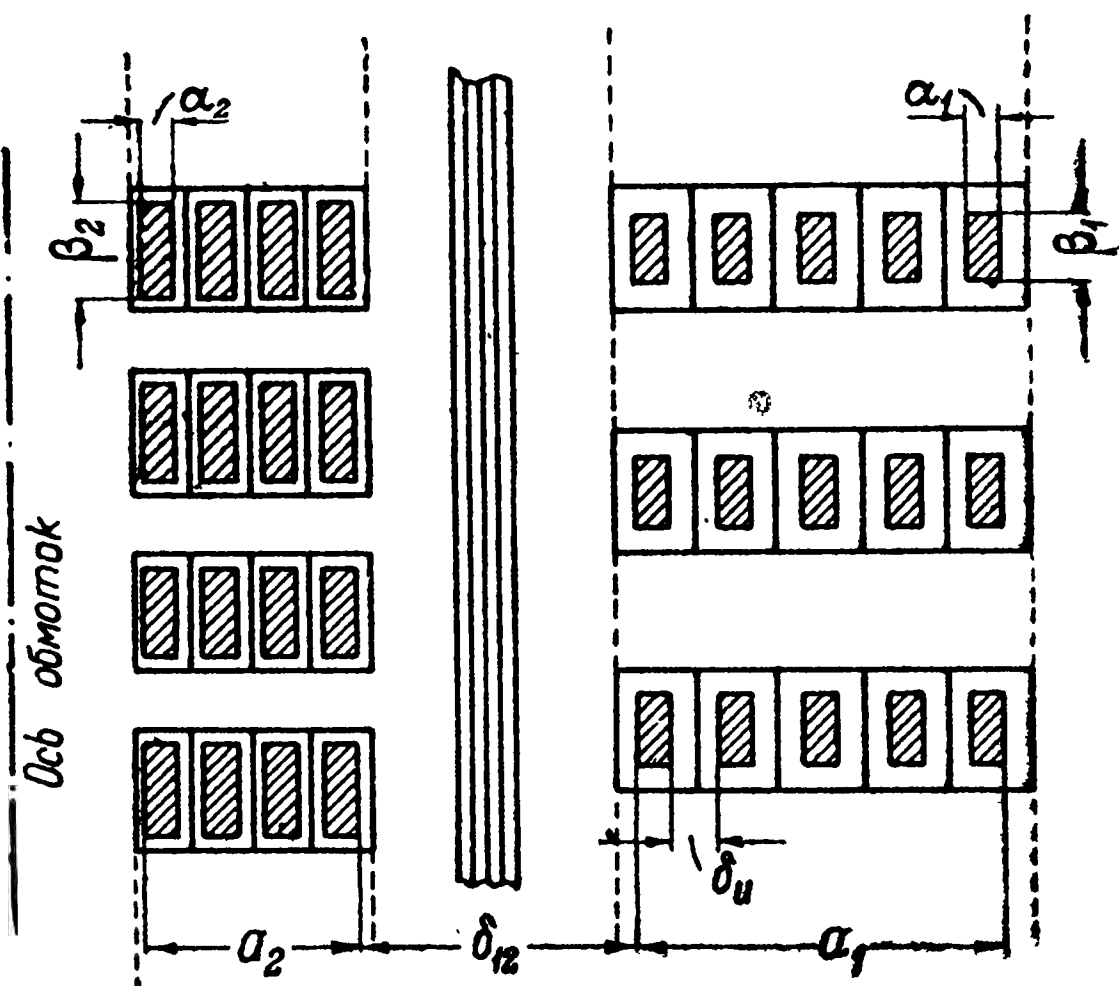


Рис. 79. Размеры катушек при расчете рассеяния.

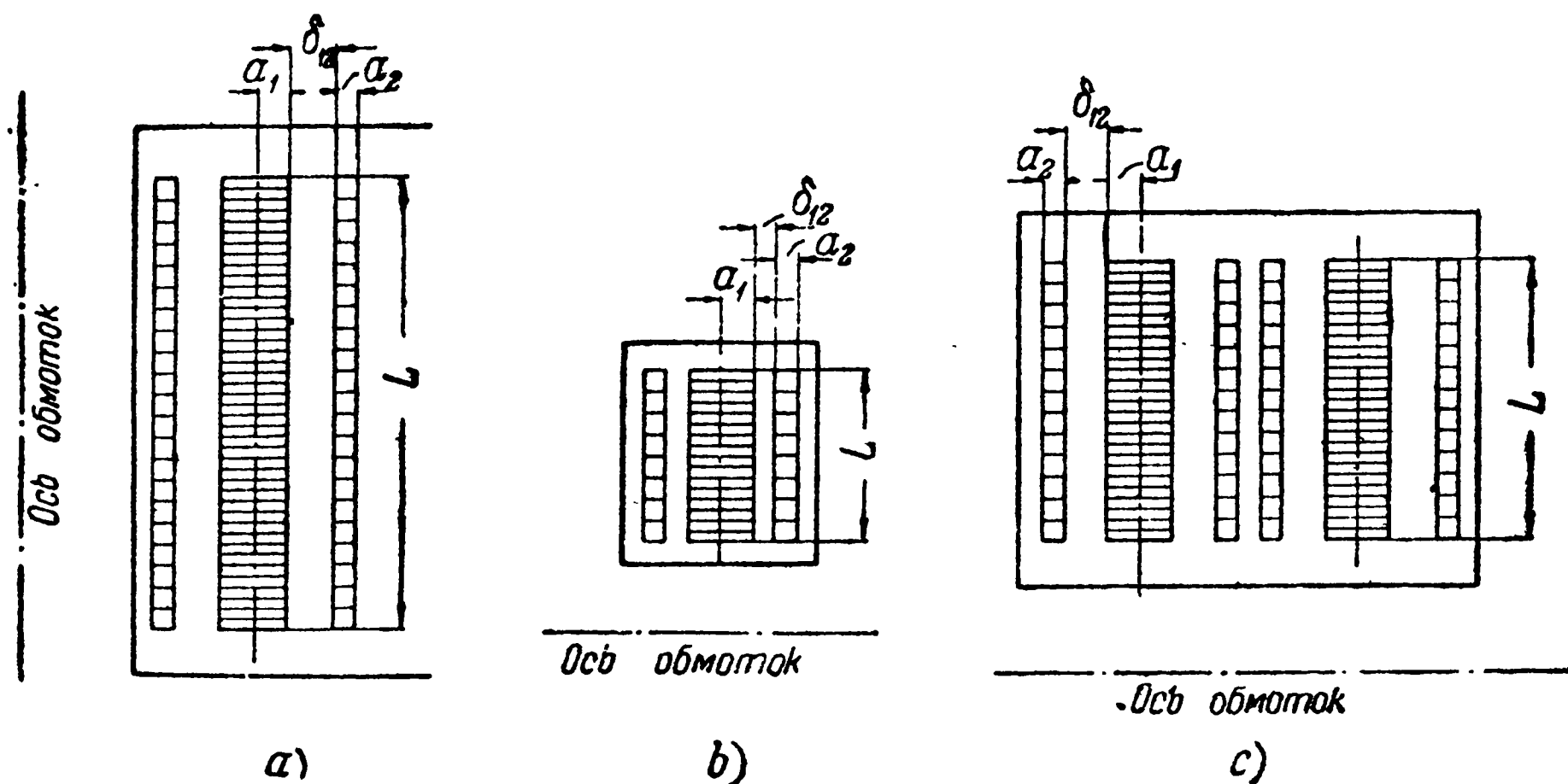


Рис. 80. Разделенные обмотки: а — концентрические; б — чередующиеся при $p = 1$; в — то же, при $p = 2$.

полных частей (групп), на которые подразделены обмотки, причем каждая такая часть состоит из группы катушек обмотки (1) высшего напряжения вместе с группой катушек обмотки (2)

низшего напряжения. Последние разделены на две подгруппы, расположенные по обе стороны группы (1). Рис. 80 *a* изображает двойную concentрическую обмотку, рис. 80 *b* — разделенные чередующиеся обмотки при $p = 1$, рис. 80 *c* — чередующиеся при $p = 2$. Нетрудно усмотреть, что $2p$ представляет общее число каналов рассеяния δ_{12} , т. е. междуобмоточных промежутков.

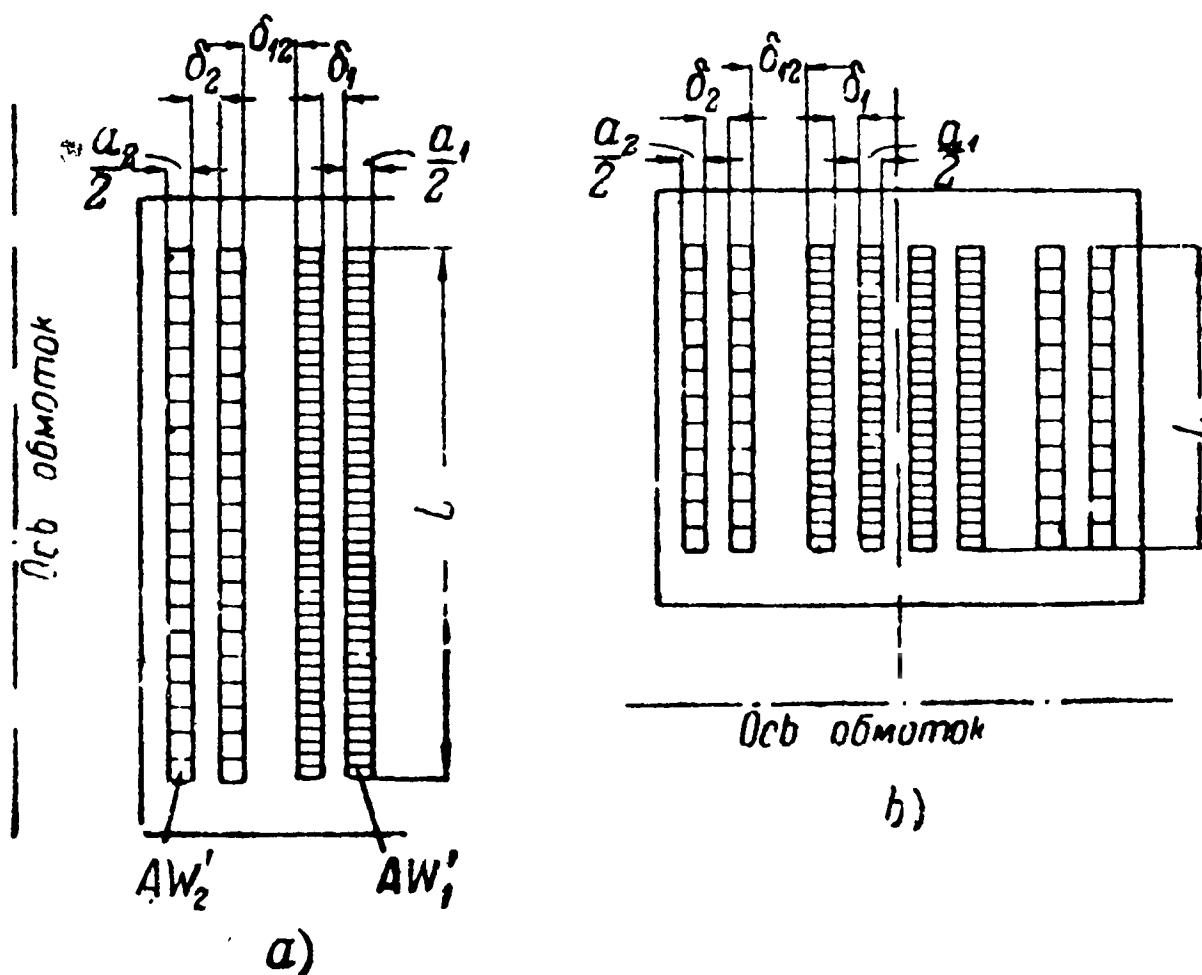


Рис. 81. Обмотки с каналами δ_1 и δ_2 : *a* — concentрические; *b* — чередующиеся.

Кроме того, индуктивность чередующихся обмоток снижается еще тем, что размер δ_s (формула 63), а следовательно и входящие в выражение его размеры a_1 и a_2 , относятся лишь к подгруппе обмоток (рис. 80 *b* и *c*). Следовательно, индуктивность чередующихся обмоток выразится так:

$$e_s = \frac{8 \cdot f \cdot P_\phi \cdot 10^{-3} \cdot l_w \cdot \delta_s}{e_w^2 \cdot 2p \cdot l_s} = \frac{4 \cdot f \cdot P_\phi \cdot 10^{-3} \cdot l_w \cdot \delta_s}{e_w^2 \cdot p \cdot l_s} \% \quad (64)$$

Выражение (61) получается из (64) как частный случай при $p = 1/2$ (одна подгруппа).

Нелишним будет отметить, что у чередующихся обмоток направление потоков рассеяния Φ_s относительно оси катушек и оси стержня будет в основном перпендикулярным, в то время как у concentрических обмоток потоки Φ_s в основном параллельны оси катушек и оси стержня трансформатора.

Подразделение каждой из обмоток каналами δ_1 и δ_2 ¹ на катушки при чередующихся обмотках или слои — при concentрических, сопровождается увеличением рассеяния; наличие этих

¹ Каналы δ_1 и δ_2 параллельны каналу δ_{12} .

каналов учитывается увеличением величины δ_s . Например, для рис. 81 а (простая концентрическая обмотка):

$$\delta_s = \delta_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} + \delta_1 \left(\frac{Aw'_1}{Aw_1} \right)^2 + \delta_2 \left(\frac{Aw'_2}{Aw_2} \right)^2, \quad (65)$$

где Aw'_1 и Aw'_2 — ампервитки частей обмоток, не прилегающих к каналу δ_{12} , $Aw_1 = Aw_2$ — полное число ампервитков каждой обмотки, a_1 и a_2 — суммарные толщины не разделенных каналами обмоток.

В частности, при разделении какой-нибудь одной из обмоток, например (2), каналом δ_2 на два одинаковых слоя:

$$\delta_s = \delta_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} + \frac{\delta_2}{4}, \quad (66)$$

где a_2 — суммарная толщина обоих слоев обмотки (2).

При подразделении каждой группы одной из чередующихся обмоток на 2, 3, 4, 6 и т. д. катушек (на рис. 81 б — четыре катушки):

$$\delta_s = \delta_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} + \delta_1 \cdot k_{s1} + \delta_2 \cdot k_{s2}, \quad (67)$$

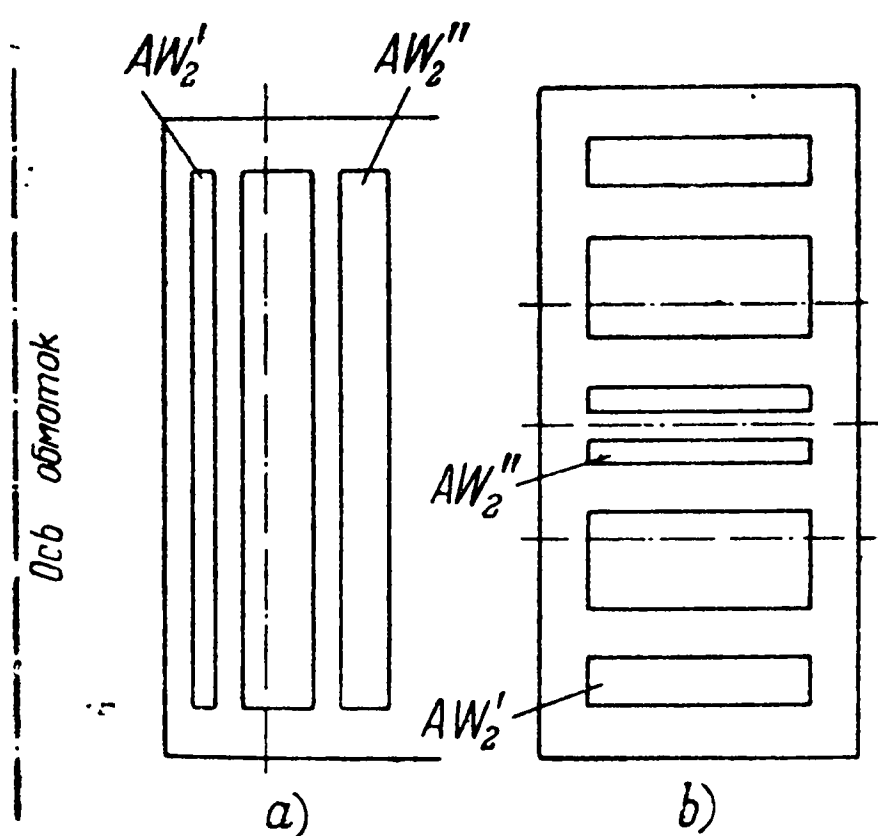


Рис. 82. Несимметрично разделенные обмотки: а — концентрические; б — чередующиеся.

результат усиления поперечной слагающей поля рассеяния. В некоторых (редких) случаях обмотки устраивают заведомо несимметричными для получения повышенной индуктивности.

Т а б л и ц а 19

Число катушек в группе	2	3	4	6
k_s	0	0,111	0,25	0,56

где коэффициенты k_s берутся из табл. 19 [Л. 103].

2. Несимметричные обмотки.

Если у одной из обмоток часть витков будет исключена, то обмотки, бывшие раньше симметричными (§ 2, п. 27), теперь становятся несимметричными; то же самое получится, если одна из чередующихся обмоток разделена на равные по ампервиткам группы, а другая — на неравные.

Всякая несимметрия обмоток вызывает повышение общей их индуктивности, что можно объяснить как результат прибавления индуктивности витков, нарушающих симметрию, или как

Ниже приведены приближенные формулы для практически важных случаев и сравнительно небольшой несимметричности (до 15%).

Рис. 82 *a* — несимметричная двойная концентрическая обмотка, рис. 82 *b* — такая же разделенная чередующаяся ($p = 2$).

Общая индуктивность их:

$$e_s = \frac{e'_s (Aw'_2)^2 + e''_s (Aw''_2)^2}{Aw_2}, \quad (68)$$

где e'_s и e''_s — индуктивности, подсчитываемые в отдельности для соответствующих частичных ампервитков Aw'_2 и Aw''_2 .

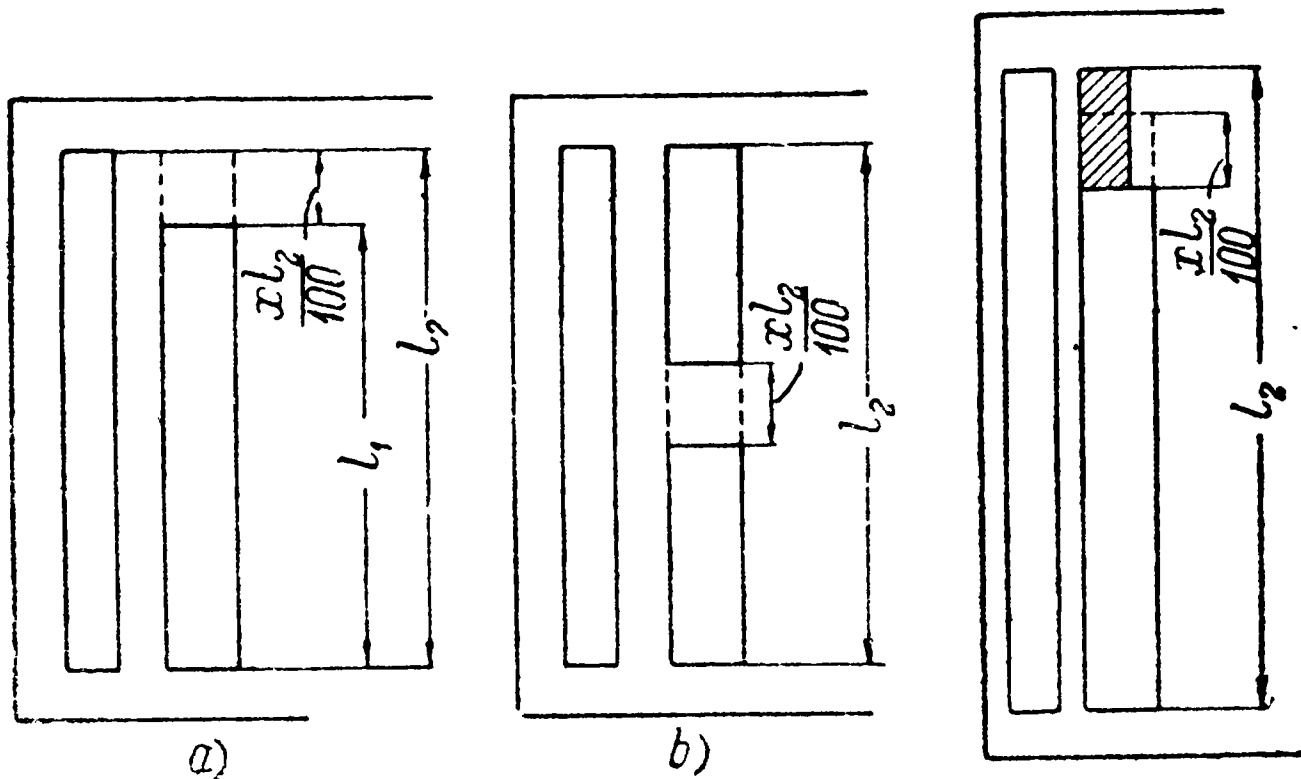


Рис. 83. Обмотки с ответвлениями: *a* — часть витков выключается с начала (или конца) стержня; *b* — то же, из середины.

Рис. 84. Выключение части слоев обмотки на части ее высоты.

Случай, когда у одной из обмоток, например (1), $x\%$ витков выключены с одного конца (рис. 83 *a*) или из середины (рис. 83 *b*) поддается расчету с большим трудом. Увеличение рассеяния, по сравнению с рассеянием симметричных обмоток, может быть характеризовано коэффициентом $K_s = 1 + \alpha_s > 1$. Вообще можно утверждать, что поправка α_s возрастает примерно пропорционально x^2 и увеличивается с увеличением отношения l_2/δ_s . Впрочем, некоторые авторы считают, что α_s зависит только от отношения $(l_2 - l_1):\delta_s$ [Л. 95, 104 и 105], и получают хорошие результаты, однако лишь для рассматриваемых частных случаев.

Выведенные рациональным путем формулы [Л. 1, стр. 261 и 262], а именно: для рис. 83 *a*:

$$K_s = 1 + \frac{l_2^2 \cdot x^2 \cdot K'_R}{3 \cdot a_1 \cdot \delta_s \cdot K_R \cdot 10^4} \quad (69)$$

и для рис. 83 *b*:

$$K_s = 1 + \frac{l_2^2 \cdot x^2 \cdot K'_R}{12 \cdot a_1 \cdot \delta_s \cdot K_R \cdot 10^4}, \quad (70)$$

где K'_R — коэффициент Роговского для поперечного поля рассеяния, равный $0,12 \div 0,25$, дают для небольших x^1 и l_2 значения поправки α_s , преуменьшенные раза в $1^{1/2}$.

Напротив, поправочные кривые [Л. 16, стр. 173], построенные по формулам АЕГ: для рис. 83 *a*:

$$K_s = 1 + \frac{x}{200} \left(1 + \frac{\pi \cdot l_2}{\delta_s} \cdot \frac{x}{100} \right) \quad (71)$$

и для рис. 83 *b*:

$$K_s = 1 + \frac{x}{200} \left(1 + \frac{\pi \cdot l_2}{\delta_s} \cdot \frac{x}{200} \right) \quad (72)$$

дают для небольших значений x^1 поправку α_s , преувеличенную раза в $1,5 \div 2$.

Случай, когда в части одной из обмоток выключается часть слоев (рис. 84), может быть сведен [Л. 16, стр. 54] с достаточной точностью к случаю рис. 83 *a* путем замены заштрихованной части обмотки равновеликой по ампервиткам частью с не уменьшенным радиальным размером a_1 . Тогда можно применить формулы (69) и (71) с соответствующими оговорками.

При большом количестве выключаемых витков их располагают на стержне в двух местах (рис. 51 *b*); в этом случае увеличение индуктивности будет примерно раза в 3 меньше, чем было бы для случая рис. 83 *a*.

Несимметричность $x^0/0$ можно легко уменьшить (примерно вдвое), если при изготовлении обмоток устроить „разгон“ витков обмотки (2), противолежа-

щих выключаемым виткам обмотки (1) (рис. 85). У цилиндрических обмоток это выполняется посредством полосок пресшпана (рис. 86, середина), у винтовых и непрерывных — путем мест-

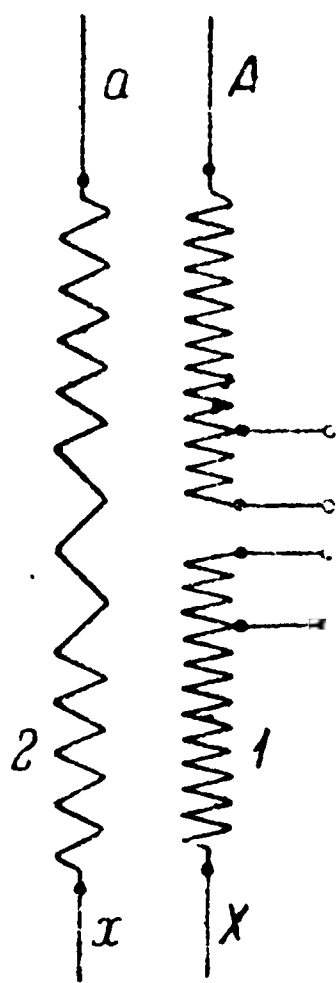


Рис. 85. „Разгон“ витков обмотки (2), противолежащих выключаемым виткам обмотки (1).

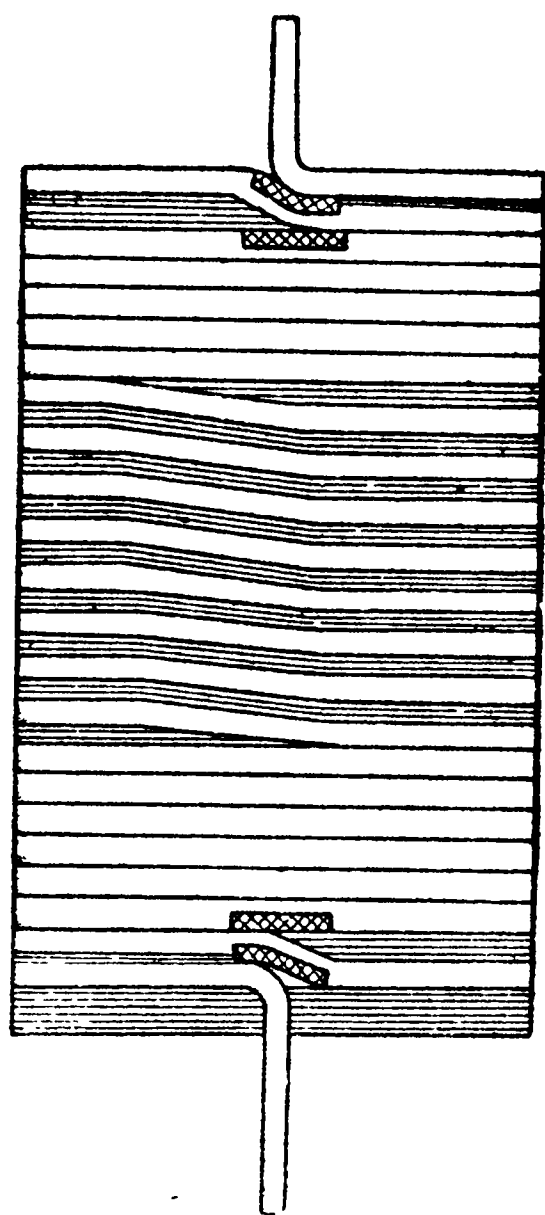


Рис. 86. Выполнение „разгона“ витков цилиндрической катушки.

¹ x редко превышает $5 \div 10\%$, но у печных и сварочных трансформаторов может составлять 50% и даже несколько больше.

ного увеличения каналов между составляющими обмотку дисковыми катушками. Этот разгон обмотки (2) следует учитывать при определении ее длины l_2 .

3. Индуктивность обмоток, соединенных в зигзаг. Если обмотка трехфазного трансформатора включена в зигзаг так,

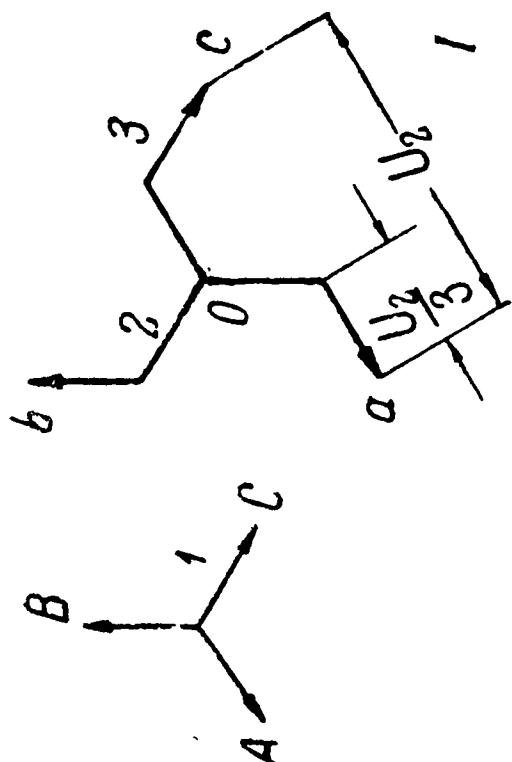
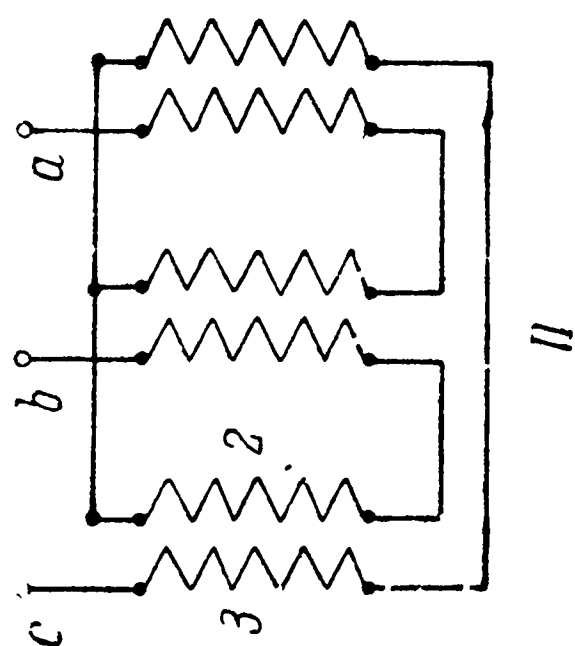
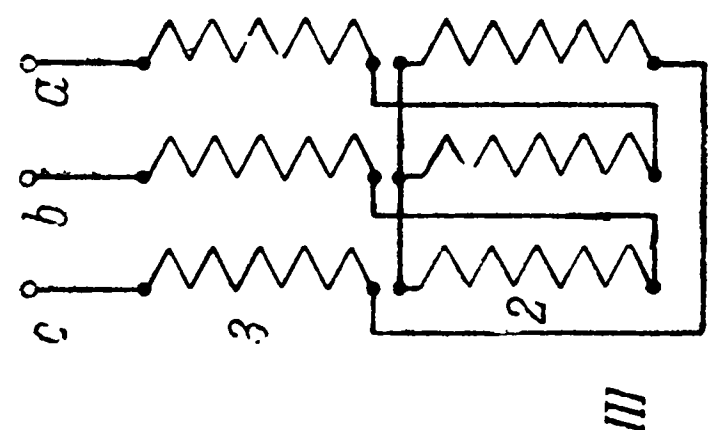


Рис. 87. Выполнение схемы соединения в зигзаг: I — векторные диаграммы; II — действительное расположение частей обмоток; III — теоретическая схема.

что части ее (2) и (3) составляют плечи зигзага (рис. 87, I), то общая индуктивность может быть подсчитана по формуле Каде (Kade):

$$e'_s = e_s + \frac{e_{s23}}{6}, \quad (73)$$

где e_s — значение индуктивности между обмоткой (1), с одной стороны, и обмотками (2) и (3), с другой, в предположении, что последние включены как обычно, т. е. в одну и ту же фазу, а e_{s23} — индуктивность между обмотками (2) и (3) в предположении, что каждая из них соединена в звезду, а ток в ней равен половине номинального.

Выводы. Из всех приведенных формул для индуктивности можно сделать следующие важные выводы.

1. Индуктивность обратно пропорциональна квадрату виткового напряжения e_w , а следовательно прямо пропорциональна квадрату числа витков. Таким образом, при изменении сечения S стержня и величины e_w в k раз,¹ индуктивность будет изменяться в k^2 раз; в этом заключается один из основных приемов „подгонки“ индуктивности к требуемому значению.

2. Индуктивность обратно пропорциональна величине магнитного сопротивления потокам Φ_s рассеяния; для обмоток по рис. 77 это сопротивление равно:

$$\frac{l_s}{\delta_s \cdot l_w} = \frac{l_2}{K_R \cdot \delta_s \cdot l_w}.$$

Следовательно, индуктивность будет больше для обмоток коротких (малое l_2) и толстых (большие a_1 и a_2) по сравнению

¹ Индукцию B считаем неизменной.

с длинными и тонкими и будет тем больше, чем более δ_{12} (формулы 63 и 65—67 для δ_s). Укорочением обмоток для увеличения индуктивности пользуются широко, но избегают для этого увеличивать δ_{12} , так как при концентрических обмотках это ведет к увеличению длины витков наружной обмотки и к излишней затрате меди.

3. Индуктивность чередующихся обмоток примерно обратно пропорциональна числу p полных групп, на которые подразделяются обмотки; изменяя p , можно „подгонять“ индуктивность чередующихся обмоток, не прибегая к увеличению величины l_2 , что повело бы к излишнему удлинению окна трансформатора.

4. Вообще можно сказать, что, желая получить минимальную индуктивность обмоток, их нужно делать взаимно симметричными и располагать настолько близко друг к другу, насколько это позволяют условия электрической прочности и условия охлаждения, в частности располагать концентрически, а в редких случаях даже наматывать бифилярно (совместно)—при одинаковом числе витков в обеих обмотках.

Это понятно на основании изложенного выше в применении к первичным и вторичным обмоткам с токами, сдвинутыми примерно на 180° .

Отсюда же понятна необходимость располагать взаимно концентрически (рис. 87, *II*) части (2) и (3) обмотки, соединяемой в Z ; если их расположить по теоретической схеме рис. 87, *III*, то индуктивность e'_s (формула 72) получится чрезмерной. При чередующихся обмотках того же эффекта достигают включением в каждой группе обмоток половины витков в цепь одной фазы, а другой половины— в цепь другой фазы.

То же относится к взаимному расположению обеих половин CD и DB обмотки главного трансформатора I в системе Скотта (§ 22, п. 4).

Равным образом, применяя для однофазных трансформаторов соединение в Z обмотки (2) при выведенном нуле и возможной неравномерности нагрузок обеих половин обмотки, их размещают по рис. 88 во избежание появления небалансированных ампервитков и значительной добавочной индуктивности.

Ко всему вышеизложенному необходимо прибавить, что точность расчетов индуктивности не превосходит $5 \div 10\%$ рассчитываемой величины; поэтому величины e_s и e_k трансформатора могут быть гарантированы с точностью, не большей $\pm 10\%$.

§ 54. Индуктивность шин

У больших низковольтных печных, нагревательных и пр. трансформаторов сопротивление активное и индуктивное шин-

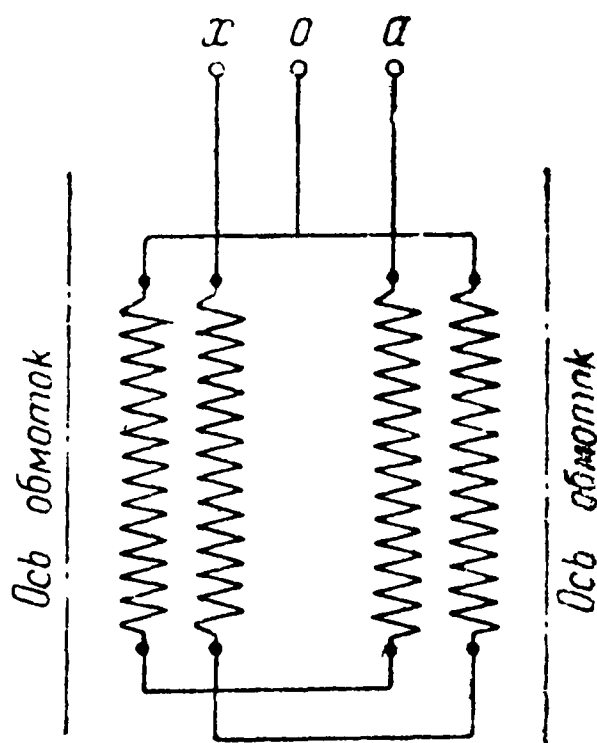


Рис. 88. Соединение в зигзаг у однофазных трансформаторов.

ных отводов может составить значительный процент хотя бы потому, что у таких трансформаторов сама вторичная обмотка часто состоит всего из 1-2 витков. Подсчет активного сопротивления шин с учетом увеличения на 5 ÷ 10% от скин-эффекта не представляет трудности.

Добавка Δe_s к индуктивности трансформатора e_s от индуктивности шин может быть приближенно подсчитана по формуле:

$$\Delta e_s = k_m \cdot \frac{w_m}{w_2} \cdot \frac{l_m}{\delta_m}, \quad (74)$$

где (рис. 89) $k_m = f\left(\frac{\delta_m}{h_m}\right)$ выражается табл. 20.

Таблица 20

$\frac{\delta_m}{h_m}$	1/4	1/2	3/4	1	2	4	7	10	∞
k_m	0,12	0,21	0,28	0,35	0,50	0,60	0,65	0,7	0,8

w_m — число витков обмотки, эквивалентное длине шин l_m , а w_2 — число витков той обмотки (2), у которой сделаны шинные отводы.

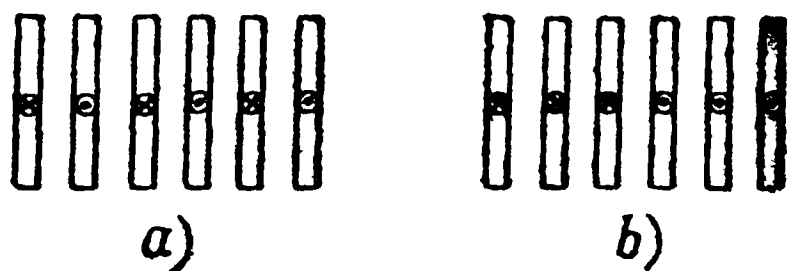


Рис. 90. Верное (a) и неверное (b) расположение подразделенных шинных отводов.

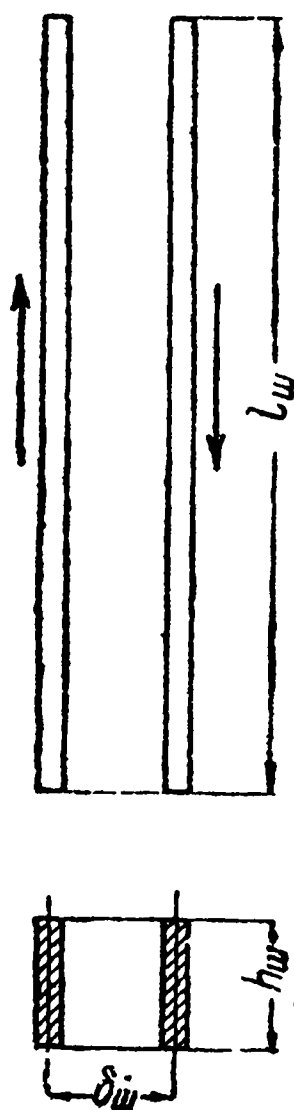


Рис. 89. Расположение шин.

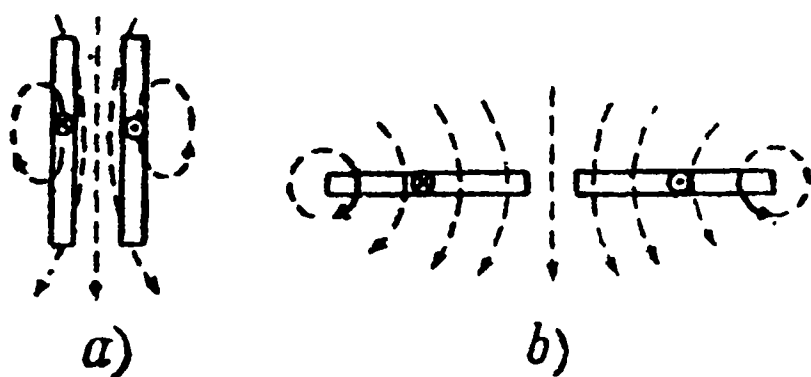


Рис. 91. Верное (a) и неверное (b) расположение шинных отводов.

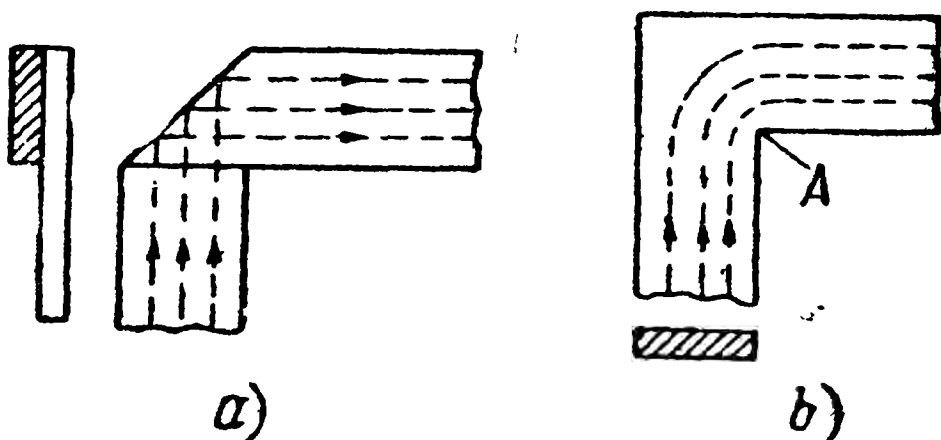


Рис. 92. Верный (a) и неверный (b) изгиб широкого шинного отвода.

Например, при $w_2 = 10$, $w_m = 2$, $\frac{l_m}{\delta_m} = 15$, $k_m = 0,5$. Тогда $\Delta e_s = 0,5 \cdot \frac{2}{100} \cdot 15 = 0,15$, т. е. индуктивность трансформатора увеличится на 15%.

Отсюда видно, что располагать шины с токами противоположного направления следует возможно ближе одна к другой. Если проходит целый ряд шин прямых и обратных или шины трех фаз, то их нужно располагать рядом параллельно и поочередно по рис. 90 *a*, но не по рис. 90 *b*.

Неправильно было бы расположить две шины в одной плоскости (рис. 91 *b*); это повело бы к большим добавочным потерям. Устройство загиба шин по рис. 92 *a* — правильное, по рис. 92 *b* — неправильное. В последнем случае будет сгущение линий тока около угла *A* [Л. 1, стр. 275].

Г Л А В А VIII

РАСЧЕТ И КОНСТРУКЦИЯ ИЗОЛЯЦИИ

§ 55. Воздействия, которым подвергается изоляция трансформаторов

Изоляция трансформаторов в разных ее частях может подвергаться различным воздействиям, по большей части несколькими одновременно. Сюда относятся:

- 1) воздействия электрические, величина которых определяется не только рабочим и испытательным напряжениями, но и теми перенапряжениями, которым может подвергнуться трансформатор;
- 2) механические усилия, действующие на обмотки при коротких замыканиях (§ 105 и 106) и передающиеся, в конечном счете, станине через изоляцию и опоры обмоток;
- 3) повышенные температуры, которым подвергаются изоляция и масло трансформатора, соприкасаясь с нагретыми активными материалами;
- 4) сложные химические процессы, происходящие в трансформаторах, как то: действие на изоляцию масла и его продуктов разложения, а также влаги и воздуха, действие металлов и воздуха на само масло и т. д. (§ 58).

О воздействиях электрических — перенапряжениях в трансформаторах — существует огромная литература; см., например, на русском языке [Л. 1, гл. 12 и Л. 107—112]. Здесь можно лишь очень кратко и в элементарной форме упомянуть о важнейших явлениях при воздействии перенапряжений на обмотки трансформаторов.

1. Достигающие трансформатора перенапряжения имеют своей причиной или атмосферные явления, или аварийные режимы (короткие замыкания и их размыкание, повторные заземляющие

дуги), или же нормальные операции по включению и выключению линий, трансформаторов и т. п. (коммутационные перенапряжения).

В зависимости от своего характера перенапряжения могут представлять или род аperiodического импульса (рис. 93а), или же периодического (затухающего) колебания (рис. 93б), а чаще всего имеют форму смешанную в виде импульса с гармониками (рис. 93с)

[Л. 1, стр. 344]. Изложенное ниже (п. 2—8) относится к бесконечно длинной волне с крутым фронтом, так как для нее анализ явлений проще.

Амплитуда коммутационных перенапряжений редко превышает $3 \div 4 U_{\phi}$, причем крутизна фронта волны примерно пропорциональна амплитуде, но другие перенапряжения могут быть в $10 \div 15$ раз больше фазного напряжения.

2. В момент достижения трансформатора волна перенапряжения U отражается с повышением амплитуды на:

$$\Delta U = \frac{z_{mp} - z_{\lambda}}{z_{mp} + z_{\lambda}} U.$$

Волновое сопротивление для воздушной линии $z_{\lambda} \approx 500 \text{ } \Omega/\text{km}$, для трансформаторов же иногда считают $z_{mp} \approx (30 \div 40) w_1$, где w_1 — число витков высоковольтной обмотки [Л. 8, стр. 196]; при $w_1 = 1000$, $z_{mp} = 30\,000 \text{ } \Omega/\text{km}$

$$\text{и } \Delta U = \frac{30000 - 500}{30000 + 500} U = 0,97 U;$$

следовательно, на трансформатор будет действовать уже перенапряжение $U_0 = 1,97 U$.

3. Обмотка трансформатора представляет сложное пространственное сочетание емкостей и самоиндукций. По отношению к малым частотам колебаний трансформатор ведет себя как ясно выраженная индуктивность, по отношению к большим — как сочетание емкостей (в упрощенном виде см. рис. 113, без пунктира). Поэтому перенапряжение в первый момент распределится вдоль обмотки по закону гиперболической функции. Для обмотки

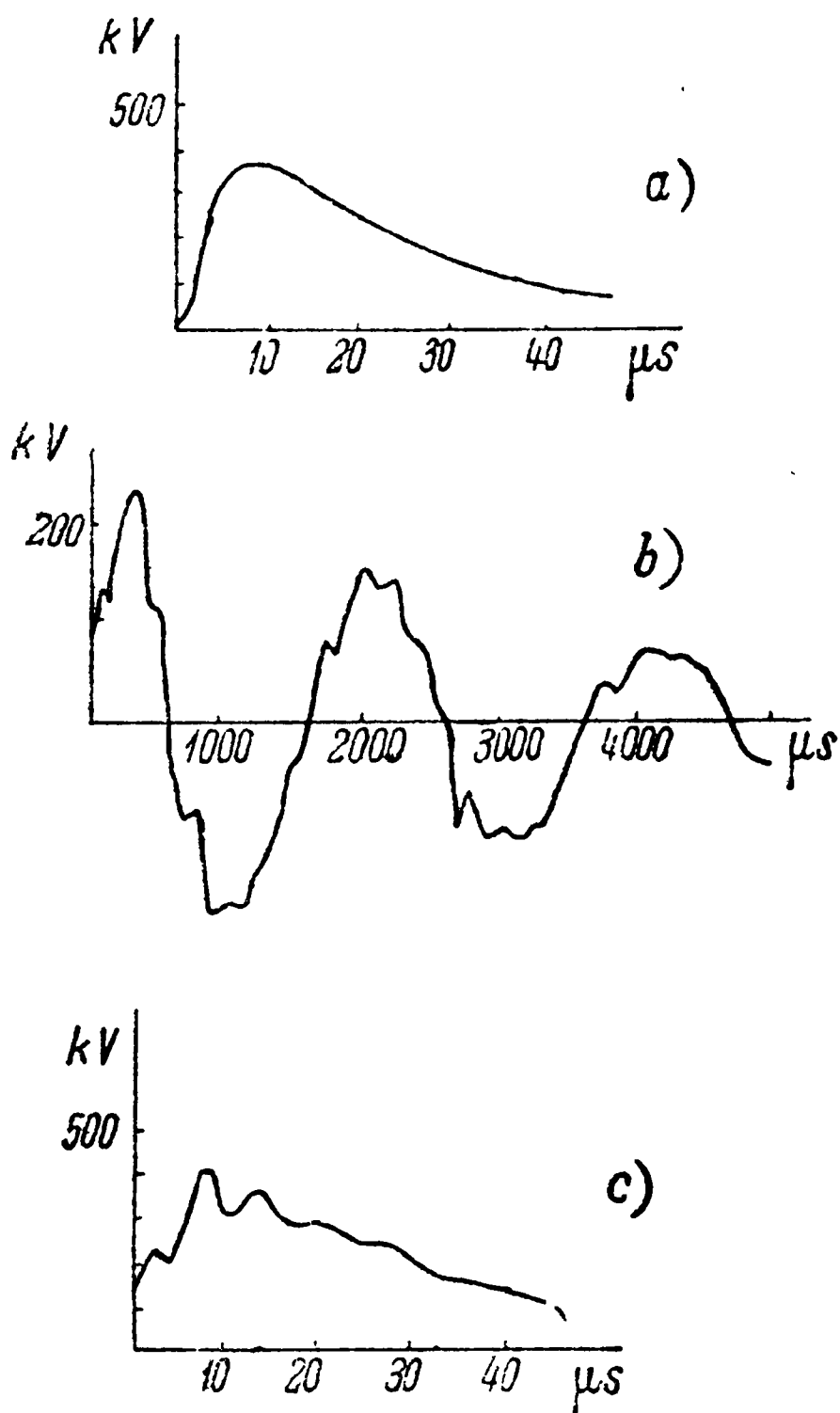


Рис. 93. Волны перенапряжений: а — аperiodическая волна; б — периодическая затухающая волна; в — аperiodическая волна с высшими гармониками.

с заземленным нулем (рис. 94 а): ¹

$$U_x = U_0 \frac{\operatorname{sh} \frac{x}{l_1} \sqrt{\frac{C'}{C}}}{\operatorname{sh} \sqrt{\frac{C'}{C}}} = U_0 \frac{\operatorname{sh} \frac{\alpha x}{l_1}}{\operatorname{sh} \alpha}, \quad (75)$$

а для обмотки с изолированным нулем (рис. 94 б): ¹

$$U_x = U_0 \frac{\operatorname{ch} \frac{x}{l_1} \sqrt{\frac{C'}{C}}}{\operatorname{ch} \sqrt{\frac{C'}{C}}} = U_0 \frac{\operatorname{ch} \frac{\alpha x}{l_1}}{\operatorname{ch} \alpha}. \quad (76)$$

Как видно, на характер этого „начального распределения“ решающее влияние оказывает величина $\alpha = \sqrt{\frac{C'}{C}}$, где C' — емкость

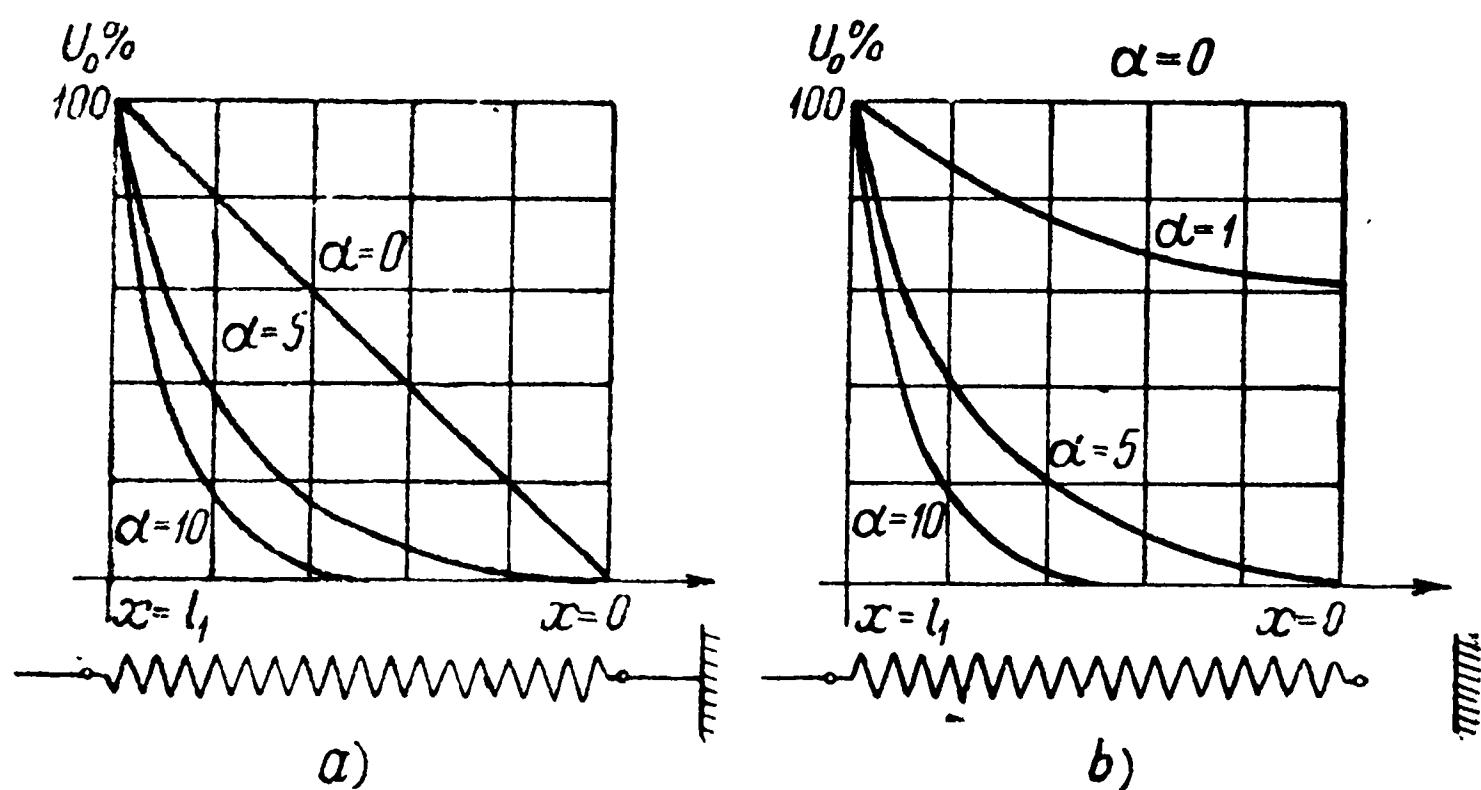


Рис. 94. а — начальное распределение бесконечно длинной волны с крутым фронтом по обмотке трансформатора с заземленным нулем для разных значений α ; б — то же, при обмотке с изолированным нулем.

высоковольтной обмотки относительно земли, а C — емкость первого элемента обмотки относительно последнего. В каждой точке обмотки существенна не столько величина U_x перенапряжения относительно земли, сколько величина ΔU_x напряжения относительно соседнего элемента обмотки. Наибольшая величина междувиткового напряжения действует между первым и вторым элементами обмотки, а именно напряжение:

$$\Delta U_{\max} \approx \frac{U_0}{w} \sqrt{\frac{C'}{C}} = \frac{U_0}{w} \cdot \alpha; \quad (77)$$

у современных трансформаторов $\alpha = 5 \div 20$. ²

¹ Рисунки из [Л. 1, стр. 354]; для простоты предполагается, что вся обмотка размещается на одном стержне и имеет высоту l_1 .

² Обратит внимание на то, что при $\alpha \geq 5$ начальные распределения одинаковы как при заземленном, так и при изолированном нуле.

В упрощенной теории, относящейся к распределению перенапряжения в простой цилиндрической катушке с w витками, таким элементом является один виток, а для высоковольтной обмотки мощного трансформатора — одна из дисковых катушек, составляющих обмотку. В последнем случае рис. 95 дает представление о распределении перенапряжения в пределах первой катушки трехфазного трансформатора 20 000 kVA, 110 kV [Л. 113, стр. 29].

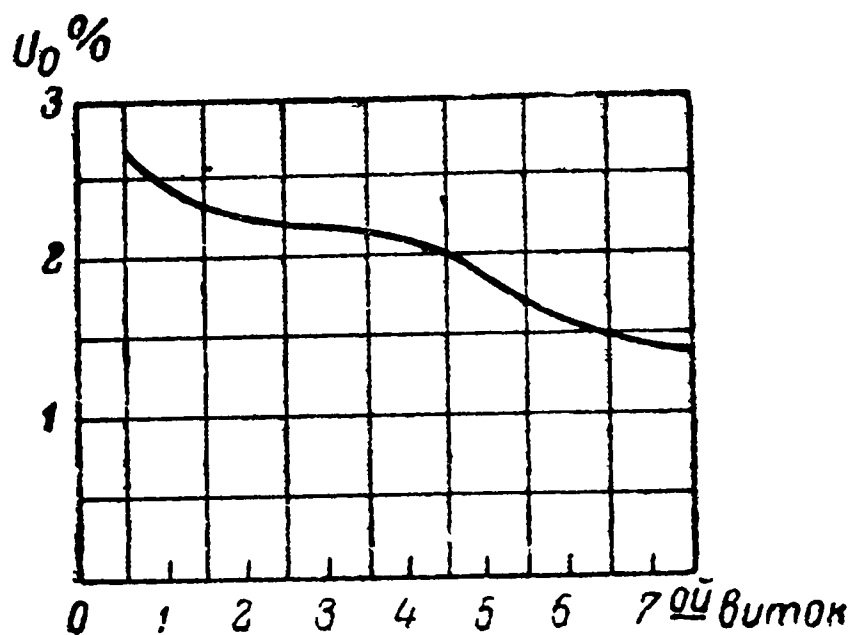


Рис. 95. Распределение перенапряжения U_0 по виткам первой катушки.

трансформатора в целом (или части ее) имеет собственные периоды колебания, вследствие чего вдоль обмотки образуются стоячие волны.

6. Волна перенапряжения, проникающая в обмотку, складывается в каждой точке обмотки с этими волнами.

7. Достигая нулевой точки, волна перенапряжения претерпевает отражение с новым повышением напряжения в этой точке (в случае изолированного нуля). Кривые рис. 97 для трансформатора с глухо-заземленным нулем и рис. 98 — при изолированном нуле представляют результат проникновения волны с крутым фронтом в трансформатор, у которого $\alpha = 10$, причем изображена часть процесса за то время t , для которого по рис. 97

$vt/l_1 = 1,2$, а по рис. 98 $vt/l_1 = 1,6$, где v — скорость распространения волны, а l_1 — длина обмотки вдоль окна [Л. 20, стр. 96 и 97].

8. Если волна перенапряжения или какая-либо из ее гармоник попадает в резонанс с какой-либо из частот собственных коле-

4. „Начальное распределение“ перенапряжения вдоль обмотки переходит (рис. 96) в „конечное распределение“, обозначенное пунктиром, путем колебательного процесса (обозначено штриховкой для $\alpha = 5$).

5. Как сложное сочетание емкостей и самоиндукций обмотка

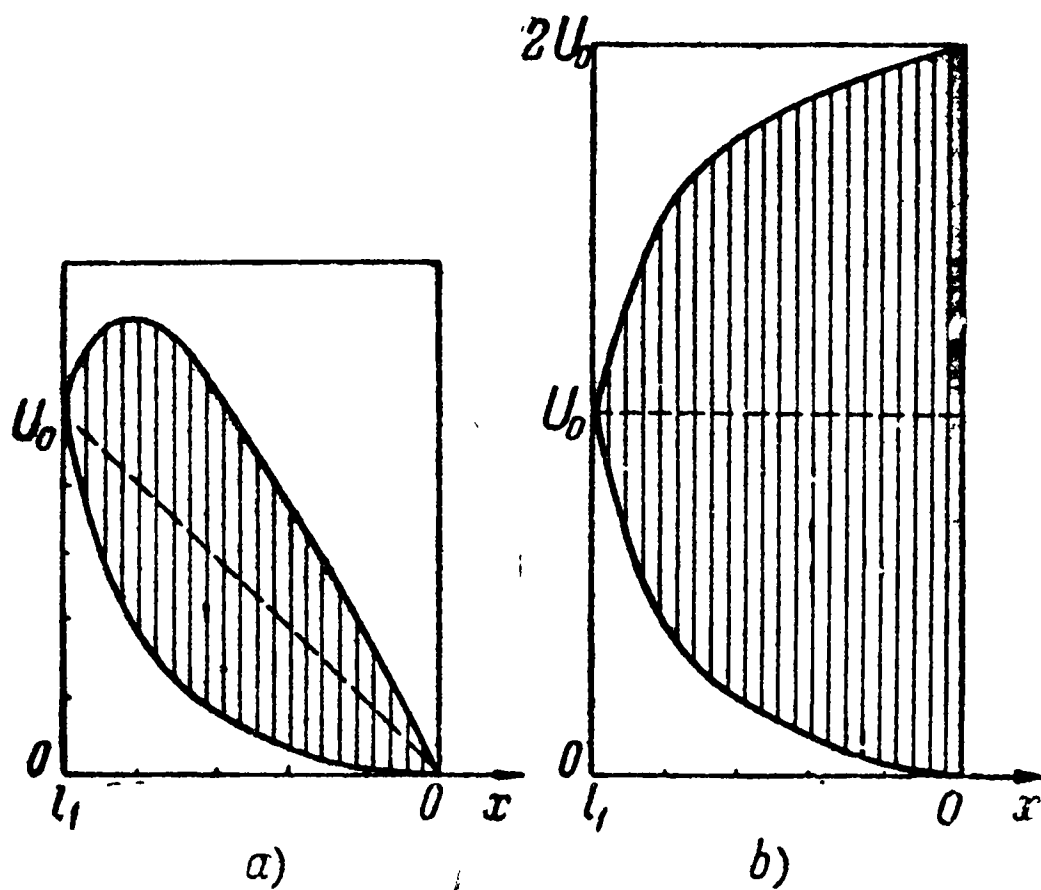


Рис. 96. Переход начального распределения перенапряжения в окончательное распределение посредством колебательного процесса: а — при заземленном нуле; б — при изолированном нуле.

баний обмотки, то образуются местные резонансные перенапряжения.

Вследствие всех перечисленных в п. 1—8 явлений между отдельными точками обмотки и землей, а также между соседними элементами обмотки (витками, катушками) возникают перенапряжения значительной величины, действующие как на „главную изоляцию“ трансформатора (определение см. § 2, п. 31), так и на изоляцию между соседними витками и катушками. Под действием

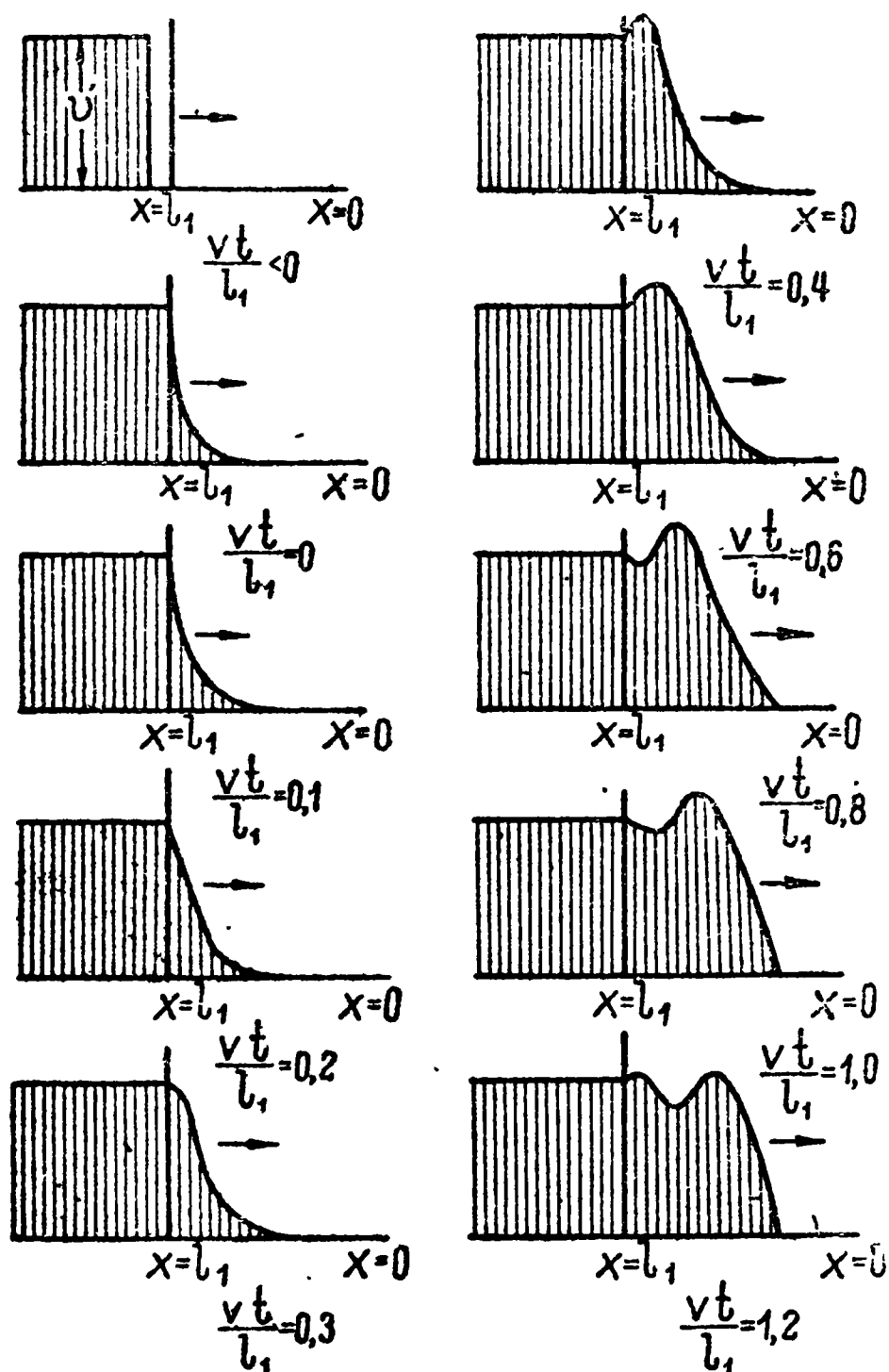


Рис. 97. Проникновение волны перенапряжения в обмотку с заземленным нулем при $\alpha = 10$; процесс в различные моменты времени.

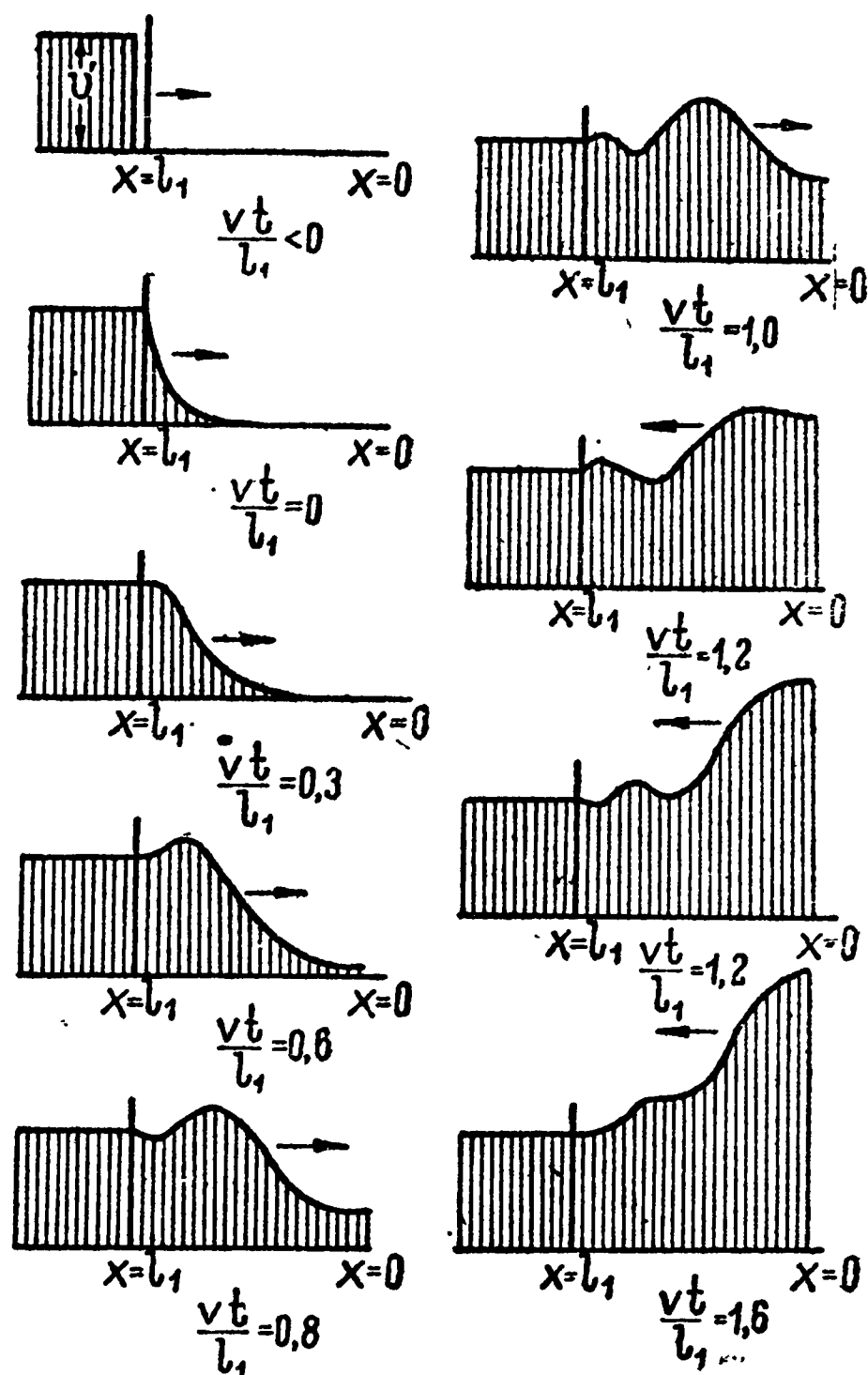


Рис. 98. То же, что на рис. 97, но при изолированном нуле.

этих местных перенапряжений изоляция трансформатора может быть повреждена; чаще всего происходят пробой между начальными витками. Вот почему условие электрической прочности является основным для конструкции трансформатора и его изоляции (§ 11).

§ 56. Испытательные напряжения трансформаторов

Изоляция трансформаторов определяется не столько рабочими напряжениями, сколько „классом“ испытательного напряжения (табл. 21).

Испытание электрической прочности новых, вполне собранных трансформаторов производится на месте изготовления трансформаторов согласно ОСТ 2524.

Все обмотки в нагретом состоянии до сих пор испытывались в течение 1 мин. синусоидальным напряжением с частотой 50 Hz, равным двойному номинальному плюс 1000 V. Первичные обмотки распределительных трансформаторов с напряжением до 550 V испытывались напряжением, как указано выше, но не ниже 10000 V. Согласно ОСТ 2524 испытательные напряжения повышаются, как указано в табл. 21.

Т а б л и ц а 21

Киловольты	Номинальное эксплуатационное напряжение обмотки	До 0,525	3	6	10	15	20	35	110	154	220
	Одноминутное испытательное напряжение	5	18	25	35	40	55	85	230	320	460

Трансформаторы с пониженной изоляцией нулевой точки (при заземлении последней непосредственно или через какое-либо сопротивление) не могут быть испытаны обычным методом.

Их испытывают индуктированным напряжением путем приложения к зажимам двойного напряжения при двойной частоте.

Следует иметь в виду, что высоковольтные испытательные трансформаторы нельзя испытывать напряжением, превышающим номинальное более чем на 20%, вследствие возможных повышений напряжения от зарядного емкостного тока.

Для специальных целей (типовые испытания) трансформаторы, а также изоляционные детали подвергаются испытанию импульсами, для которых выбраны две стандартные формы волн — 0,5/1,5 мкс и 1,5/40 мкс, причем первая цифра относится к фронту волны, а вторая — к хвосту (рис. 99).

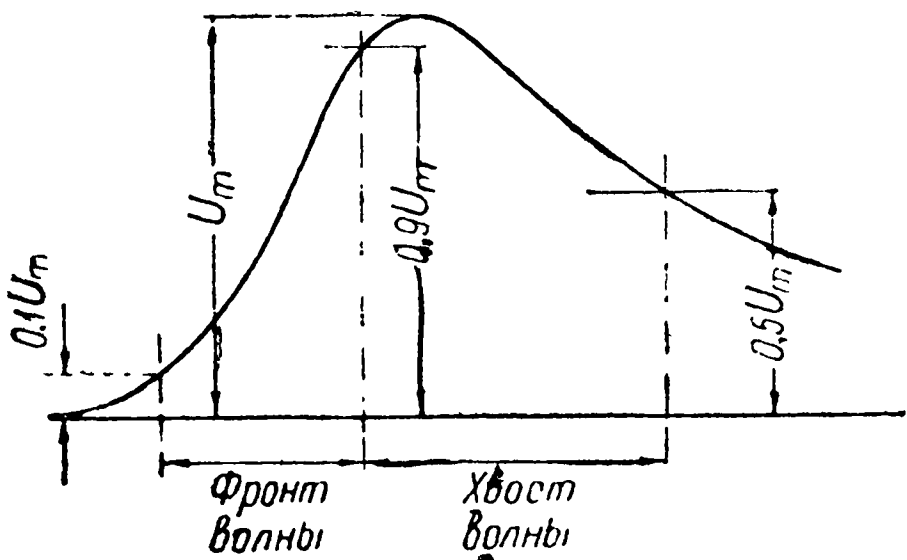


Рис. 99. Стандартная волна для проб импульсами.

§ 57. Изоляционные материалы, применяемые для трансформаторов

1. Бумага является в настоящее время одним из важнейших изоляционных материалов в трансформаторах, так как применяется для изоляции проводов, слоев в катушках, добавочной изоляции целых катушек и отводов, для оклейки листов стали

и изготовления прессованных из лакированной бумаги частей и материалов (см. п. 4 этого параграфа).

Применяемые сорта бумаги:

Кабельная	толщиной	0,1 ÷ 0,22 mm
Телефонная	”	0,08 ÷ 0,15 ”
Оклеечная	”	0,03 ÷ 0,04 ”

2. *Пресшпан* толщиной 0,2÷3,0 mm отличается от бумаги, главным образом, бóльшими: плотностью, прочностью и удельным весом; до толщины 0,5 mm — в рулонах. Применяется для прокладок между катушками (шайбы) и между отдельными витками (полоски), затем как материал для изолирующих деталей (рейки, осевые опоры, ярмовая и междофазная изоляция и т. д.); применяется также для изоляции прессующих накладок от сердечника, для изоляции шпилек и т. д. По большей части пресшпан употребляется просушенный и пропитанный лаком или маслом; часто детали из него подвергаются добавочной спрессовке (например, после склеивания лаками).

Пробивная прочность пресшпана в эффективных киловольтах, по данным AEG, приведена в табл. 22.

Т а б л и ц а 22

Толщина в милли- метрах	В воздухе		П о д м а с л о м			
	не пропитанный		пропитанный маслом		пропитанный лаком	
	при доставке	после 8 час. сушки	при 20° C	при 75° C	при 20° C	при 75° C
0,2	2,5	2,8	14	14	14	15
0,5	5,5	6	29	27	18	19
1,0	10	11	46	40	20	21
2	17	21	60	53	38	40
3	24,0	30	68	63	47	50

3. *Картон*ы разной марки, например, так называемый элфантайд для прокладок, щитов, для изготовления угловых шайб (рис. 109) и т. д. Преимущество картонов, как и пресшпана, в том, что они мало страдают от разрядов по поверхности (п. 4). Электрическая прочность примерно такая же, как для пресшпана.

4. *Пресбак*, *гетинакс* и другие материалы из лакированной и спрессованной затем бумаги, из которой изготовляют цилиндры, трубки, листы и пластины. Материалы эти обладают большой прочностью, в особенности на сжатие, и сравнительно легко обрабатываются. Их недостатком является чувствительность к разрядам по поверхности. Первый же разряд „въедается“ в поверхность. Примерная пробивная прочность (под маслом) для пластин пресбака указана в табл. 23 по данным AEG.

Таблица 23

Толщина в миллиметрах	2	4	6	10
Пробивное напряжение в киловольтах при $+20^{\circ}\text{C}$	50	68	81	105
То же, при $+75^{\circ}\text{C}$	26	36	42	—

Для цилиндров из гетинакса пробивная прочность несколько больше, так как процесс изготовления гарантирует лучшие качества.

5. *Фибра* — из специально обработанной бумажной массы — очень прочный и легко обрабатывающийся материал в виде пластин, листов и палок. В трансформаторах употребляется для прокладок, а также для болтов, шпилек и гаек (в тех случаях, когда нежелательно ставить металлические). Фибра прочнее пресшпана. Листовая фибра называется иногда летероидом. Недостаток фибры — ее гигроскопичность.

6. *Лента изоляционная* разных сортов: батистовая толщиной $0,1 \div 0,2$ mm и шириной не более 20 mm, миткалевая толщиной $0,12 \div 0,15$ mm и шириной $10 \div 50$ mm, тафтяная и киперная лента толщиной до 0,25 mm и шириной $10 \div 50$ mm (ОСТ 5610).

7. *Лаки* масляные (желтые) и асфальтовые (черные). Из спиртовых лаков применяются растворы шеллака, бакелита и глифталя; первый растворим в масле, второй и третий (после надлежащей тепловой обработки) в масле нерастворимы. Для трансформаторов пропиточные лаки имеют большее значение, чем лаки покровные.

Пропитка волокнистой изоляции лаками дает: а) увеличение электрической прочности (табл. 22), б) увеличение механической прочности, в) увеличение теплопроводности (важно для отвода тепла) и г) уменьшение гигроскопичности. Некоторые фирмы, однако, считают, что лучше обойтись без специальной пропитки обмоток в трансформаторах с масляным охлаждением, так как не совсем безукоризненная пропитка хуже, чем отсутствие всякой пропитки. Особым процессом является бакелизация обмотки, т. е. пропитка ее раствором бакелита с последующей тепловой обработкой.

8. *Компаунды* из асфальтов и битумов применяются для изоляции высоковольтных катушек трансформаторов с воздушным охлаждением и иногда для заливки проходных изоляторов и кабельных выводов.

9. *Лакоткани* (эксцельсиор, кембрик) представляют прочную, а некоторые и маслоупорную, изоляцию в виде листов или лент с волокнами под углом $30 \div 60^{\circ}$ к длине (для большей эластичности). Сорта: черный и желтый; первый имеет меньший угол потерь ($\text{tg}\delta = 0,3$ против 0,8 для второго) и большую эластичность, в то время как второй (желтый) более маслостоек. Лакоткани применяются для изолировки отводов и высоковольтных катушек.

10. *Миканит* — щипанная слюда, наклеенная обычно раствором шеллака на бумагу или ткань. Толщина миканита 0,1—1,0 мм; имеются сорта, нерастворимые в масле. Миканит применяется в качестве теплостойких прокладок с высокими изолирующими свойствами.

11. *Дерево* (бук, береза) применяется хорошо просушенное и пропитанное трансформаторным маслом, олифой, лаками или парафином. Преимущества дерева — общедоступность, дешевизна, легкая обрабатываемость. Для небольших трансформаторов с масляным охлаждением применение дерева дает не только удешевление конструкции, но и уменьшение количества масла, так как деревянная станина вытесняет гораздо больший объем масла, чем стальная, масло же стоит дороже дерева. Недостаток дерева — его гигроскопичность, даже в пропитанном состоянии, и непостоянство свойств.

12. *Фарфор* и тому подобные материалы применяются, главным образом, для проходных изоляторов (§ 64), а также разных втулок, например для крепления высоковольтных отводов на деревянных конструкциях, даже при напряжениях 3—6 kV, из-за ненадежности дерева как изоляции (см. чертеж III в приложении).

Некоторые свойства перечисленных изоляционных материалов описаны в табл. IV в приложении.

С точки зрения теплостойкости, согласно Правил и Норм, все изолирующие материалы, применяемые в трансформаторах, разделяются на следующие четыре класса.

Класс О: не пропитанные и не погруженные в масло волокнистые материалы, как то: хлопчатобумажная ткань и пряжа, натуральный шелк, бумага и тому подобные органические вещества.

Класс А: пропитанные или погруженные в масло волокнистые материалы, как то: хлопчатобумажная пряжа и ткань, натуральный шелк, бумага и тому подобные органические вещества; к этому же классу относится также эмаль, служащая для покрытия проводников.

Класс В: препараты из слюды, асбеста и тому подобных материалов минерального происхождения со связующими веществами.

Если совместно с изоляционным материалом класса *В* с целью крепления применяется в небольшом количестве изоляционный материал класса *А*, то подобная комбинированная изоляция может быть отнесена к классу *В* в том случае, если электрические и механические свойства обмотки с этой изоляцией не ухудшаются из-за действия более высокой температуры, допускаемой для материалов класса *В* (здесь под словами „ухудшение“ следует понимать, что не будут иметь места никакие изменения, которые могут сделать изоляцию непригодной для длительной работы).

Класс С: слюда без связующих материалов, фарфор, стекло, кварц и другие подобные материалы.

§ 58. Трансформаторное масло

Согласно ОСТ 7959 трансформаторное масло должно удовлетворять следующим техническим условиям:

Удельный вес при 20°/4° С ¹ не более	0,896
Температура вспышки по Мартенс-Пенскому не менее	140° С
Вязкость по Энглеру при 20° С не более	6,0
То же при 50° С не более	1,8
Температура застывания не более	—45° С
Натровая проба с подкислением не более	1 балл
Кислотное число в миллиграммах КОН не более	0,05
Механических примесей	Отсутствие
Минеральных кислот и щелочей	Отсутствие
Помутнение	Прозрачно при + 5° С
Окисляемость:	
а) осадок после окисления не более	0,15%
б) кислотное число в миллиграммах КОН не более	0,6
Активная сера	Отсутствие
Золы не более	0,005%

Масло служит для охлаждения трансформаторов, а также в качестве диэлектрика, заполняющего в трансформаторе все

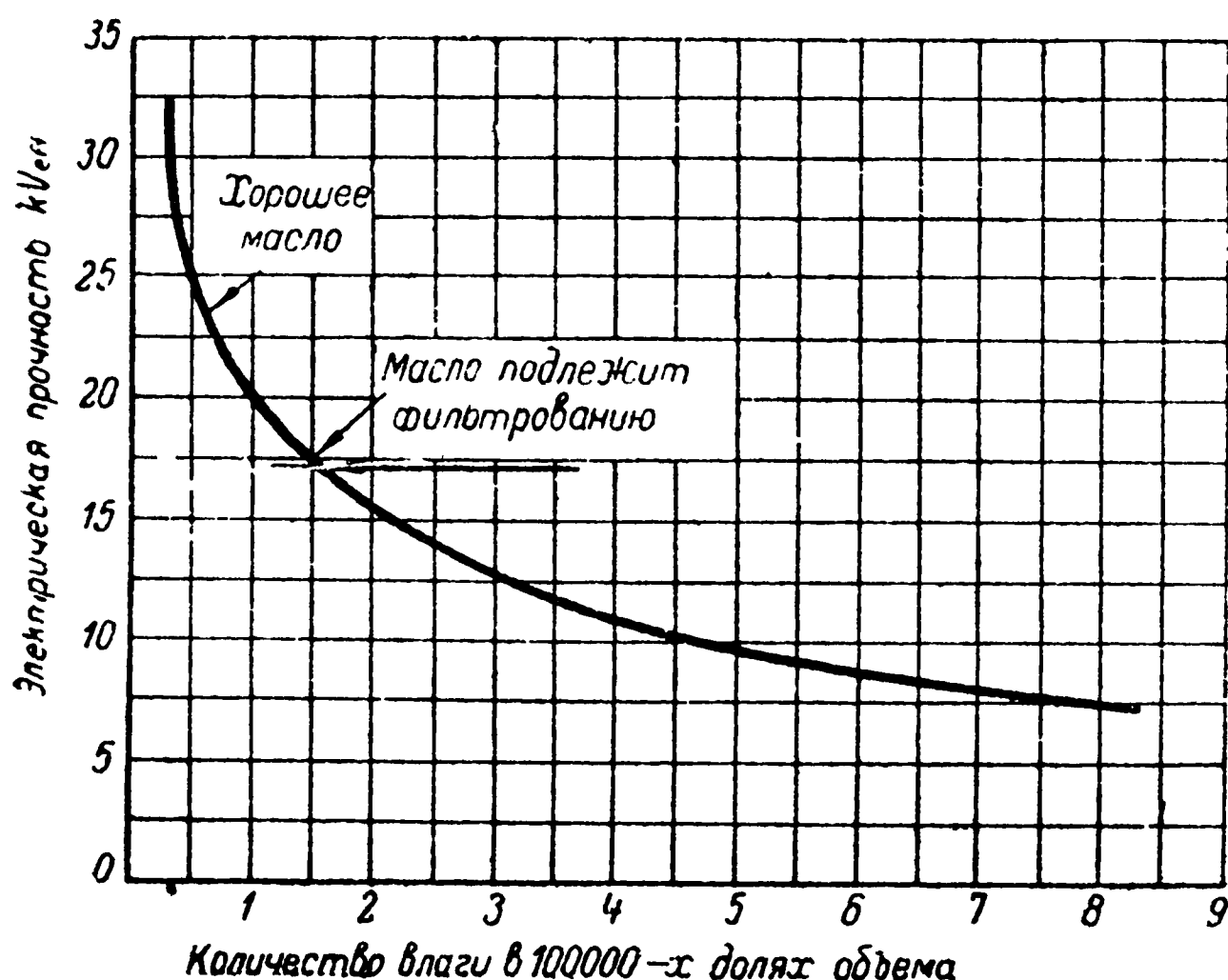


Рис. 100. Электрическая прочность масла в зависимости от содержания в нем влаги.

изоляционные промежутки и пропитывающего волокнистую изоляцию, причем такого диэлектрика, который после пробоя весьма легко восстанавливает свои свойства. Однако масло не

¹ Считая масло при + 20° С по отношению к воде при + 4° С.

должно содержать даже следов взвешенных частиц, волокон и т. п., так как эти частицы притягивают влагу¹ и, располагаясь вдоль линий электрического поля, образуют проводящие „мостики“, ведущие к пробоям (отсюда — важность применения в масле твердых барьеров).

При практическом применении масла следует иметь в виду следующие его свойства:

1) снижение электрической прочности при увеличении процентного содержания влаги (рис. 100);

2) окисление с образованием смолистых осадков от совокупного действия температуры и кислорода воздуха; эти осадки покрывают активную часть трансформатора, засоряют каналы и нарушают теплоотдачу (рис. 101);

3) каталитическое действие металлов, в особенности меди, на процессы окисления масла.

Во избежание „старения“ и порчи масла принимаются следующие меры.

а. Температура в верхних слоях масла при эксплуатации не допускается выше $60 + 35 = 95^{\circ}\text{C}$ для трансформаторов с естественным масляным охлаждением (для новых трансформаторов с водяным охлаждением $25 + 50 = 75^{\circ}\text{C}$). При сушке трансформаторов без вакуума температуру масла не рекомендуется держать выше 90°C , так как в это время трансформатор не имеет консерватора (см. ниже, п. с).

б. Во избежание порчи масла от причины, указанной в п. 3,

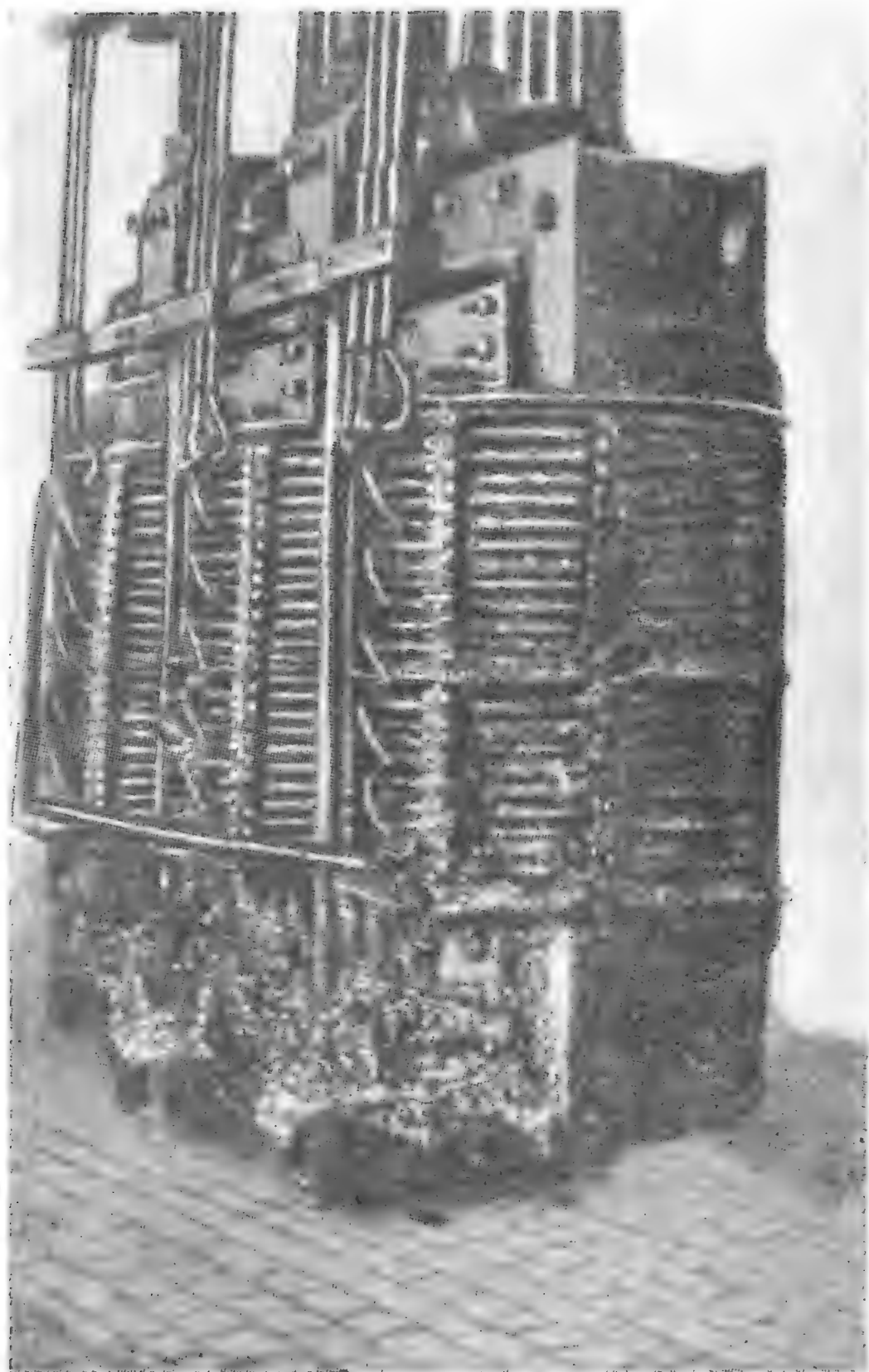


Рис. 101. Образование осадков из масла на выемной части мощного трансформатора.

¹ По общему правилу влага вытесняет масло из волокнистых материалов и становится на его место.

внутри трансформатора не применяют голых шин, проводов, змеевиков и т. д., но покрывают первые изоляцией или лаком, а последние — лаком или полудой.

с. Во избежание соприкосновения масла с воздухом на трансформатор ставится „консерватор“, т. е. специальный расширительный сосуд, соединяемый трубкой с баком трансформатора (см. чертежи I и III в приложении). Масло целиком заполняет бак, а верхний уровень масла приходится в консерваторе, вследствие чего масло портится гораздо меньше; скопляющаяся в консерваторе влага может быть легко из него удалена через спускной кран. Объем консерватора должен быть рассчитан так, чтобы уровень масла оставался видимым в маслоуказателе при колебаниях температуры от $+35$ до -35°C , т. е. в пределах 70°C , что соответствует изменению объема¹ на $70 \cdot 0,00069 = 0,049$ или $4,9\%$. Поэтому объем консерватора берут обычно равным $8 \div 10\%$ объема масла в трансформаторе. Лишь мелкие трансформаторы (до 100 kVA) делают без консерватора.

В Америке довольно распространены мощные трансформаторы без консерватора, в которых верхняя часть заполнена азотом, предохраняющим масло от окисления и служащим буфером при вспышках внутри трансформатора. Специальный поглотитель кислорода обеспечивает проход в трансформатор лишь нейтральному азоту при изменении температуры („дыхании“) трансформатора.

д. За маслом ведется систематический надзор; оно требует ухода за собой (анализы, фильтровка).

О свойствах трансформаторного масла подробно см. [Л. 114—117], а также табл. IV в приложении.

В последние годы сделана попытка [Л. 118—119], уже удавшаяся, заменить масло другим веществом с лучшими свойствами. В США и Германии применено вещество, называемое „пиранолом“.² Это бесцветная жидкость, уд. веса около 1,4, негорючая и невзрывающаяся с значением $\epsilon \approx 4$, с вязкостью, меньшей чем у масла, но не меньшей электрической прочностью. Пока пиранол примерно в $2\frac{1}{2}$ раза дороже масла, но уже применяется для трансформаторов, работающих в тяжелых условиях, при высоких температурах и вблизи пламени (печные трансформаторы); есть уже целые серии пираноловых трансформаторов. Недостатком пиранола является резко повышенный $\text{tg}\delta$ в пределах от -40° до 0°C , что однако не существенно для трансформаторов при внутренней их установке.

§ 59. Диэлектрики в электрическом поле трансформатора

Весьма многие факторы влияют на поведение диэлектриков в электрическом поле; отсылая интересующихся к огромной, сюда относящейся литературе, например [Л. 114—117 и 120—129],

¹ Коэффициент объемного расширения масла равен 0,00069.

² Продукт химической переработки бензола C_6H_6 в дифинил с дальнейшей заменой части атомов водорода на атомы хлора.

приходится указать лишь на некоторые основные положения, важные при выборе изоляции трансформаторов и ее конструкции.

1. По характеру пробоя изоляции различают пробои: а) тепловые, б) чисто электрические и с) химические. В первом случае при длительном приложении напряжения температура диэлектрика начинает возрастать вследствие имеющих в нем диэлектрических потерь, благодаря чему сопротивление его падает, и явление идет, усиливаясь, до пробоя диэлектрика. При электрическом пробое имеет место разрушение и распадение молекул диэлектрика на составные ионы под влиянием внешнего электрического поля; конечно, имеющаяся уже в диэлектриках, хотя бы ничтожная, ионизация (по Роговскому), а также объемные заряды (по акад. А. Ф. Иоффе) способствуют электрическому пробое. Пробой диэлектрика при импульсах — электрический. При „химическом пробое“ имеют место химические изменения в диэлектрике под действием повышающейся температуры и электрического поля, причем свойства получающихся продуктов разложения и определяют в дальнейшем поведение диэлектрика в целом.

2. Существенное влияние на пробой диэлектриков оказывает геометрическая форма электрического поля (степень его однородности),¹ что практически определяется формой электродов и самого образца.

В общем случае пробивное напряжение $U_{пр}$ можно выразить формулой:

$$U_{пр} = k_{пр} \cdot \delta_u^\alpha \text{ kV}, \quad (78)$$

где $k_{пр}$ — некоторый коэффициент, а δ_u — толщина диэлектрика.

При вполне однородном поле $U_{пр}$ возрастает примерно пропорционально δ_u ; в этом случае $\alpha = 1,0$.

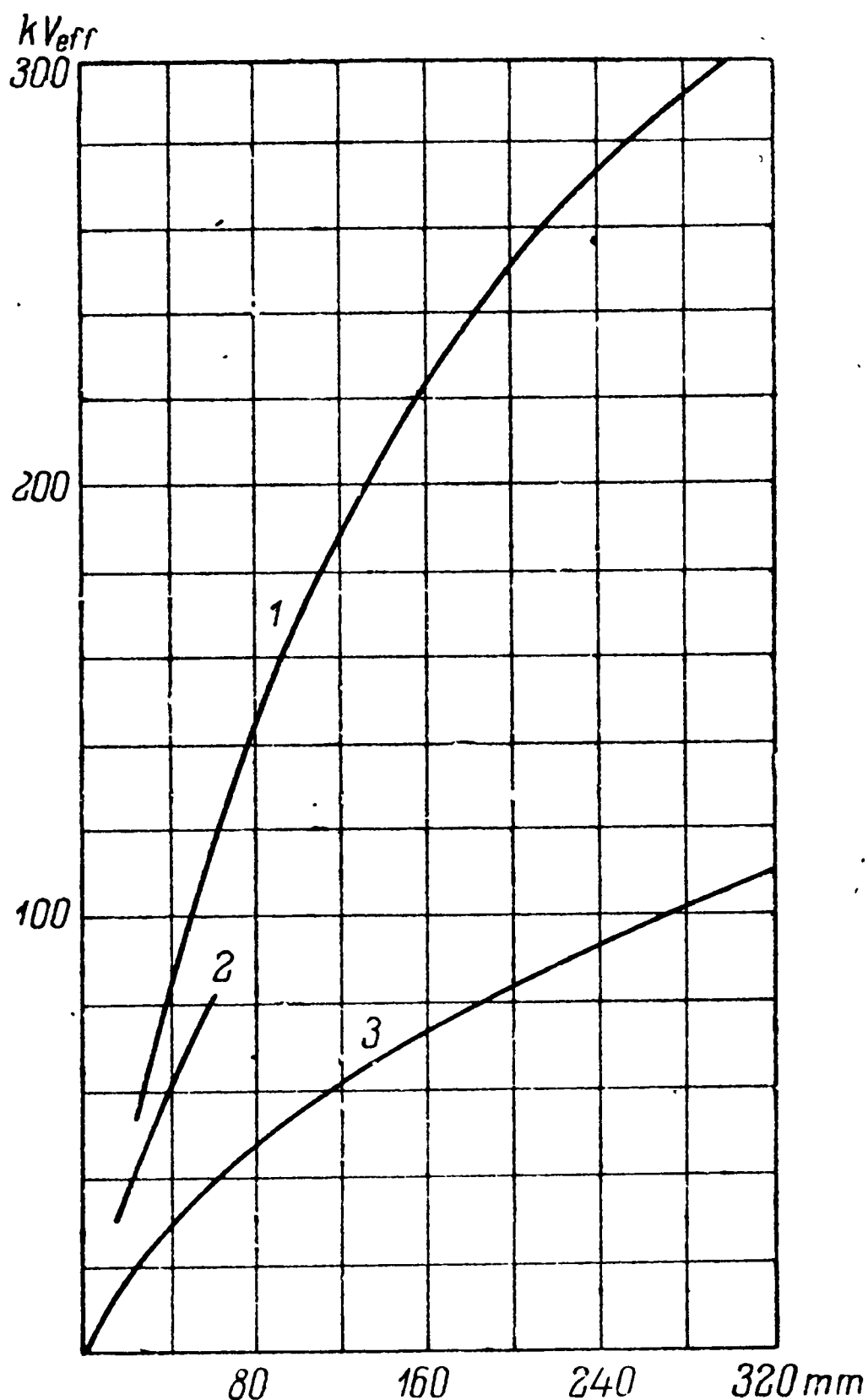


Рис. 102. Пробивные напряжения для воздуха при разной неоднородности электрического поля: кривая 1 — шары Ø 250 мм; кривая 2 — шары Ø 50 мм; кривая 3 — иглы.

¹ Однородным называется поле, имеющее одинаковые величину и направление во всех рассматриваемых точках.

Кривые рис. 102 [Л. 128, стр. 115—119] пробивных напряжений для воздуха показывают, как увеличивается пробивной градиент по мере увеличения однородности поля (применение шаров большого диаметра).

Кривые рис. 103 (ср. 3 и 5) для масла указывают на такую же зависимость.

Чем больше неоднородность поля, тем меньше становится показатель α , и тем медленнее возрастают пробивные напряжения $U_{пр}$ с увеличением толщины δ_u , причем α имеет тенденцию стремиться к некоторому пределу. Рис. 104 [Л. 117, стр. 421] хорошо это иллюстрирует. Пунктирные кривые соответствуют увеличивающейся неоднородности поля; нижняя кривая — для предельно малого значения α , верхняя — для однородного поля.

3. С увеличением толщины δ_u твердого диэлектрика пробивной градиент уменьшается, так как нарушается однородность самого диэлектрика. Это

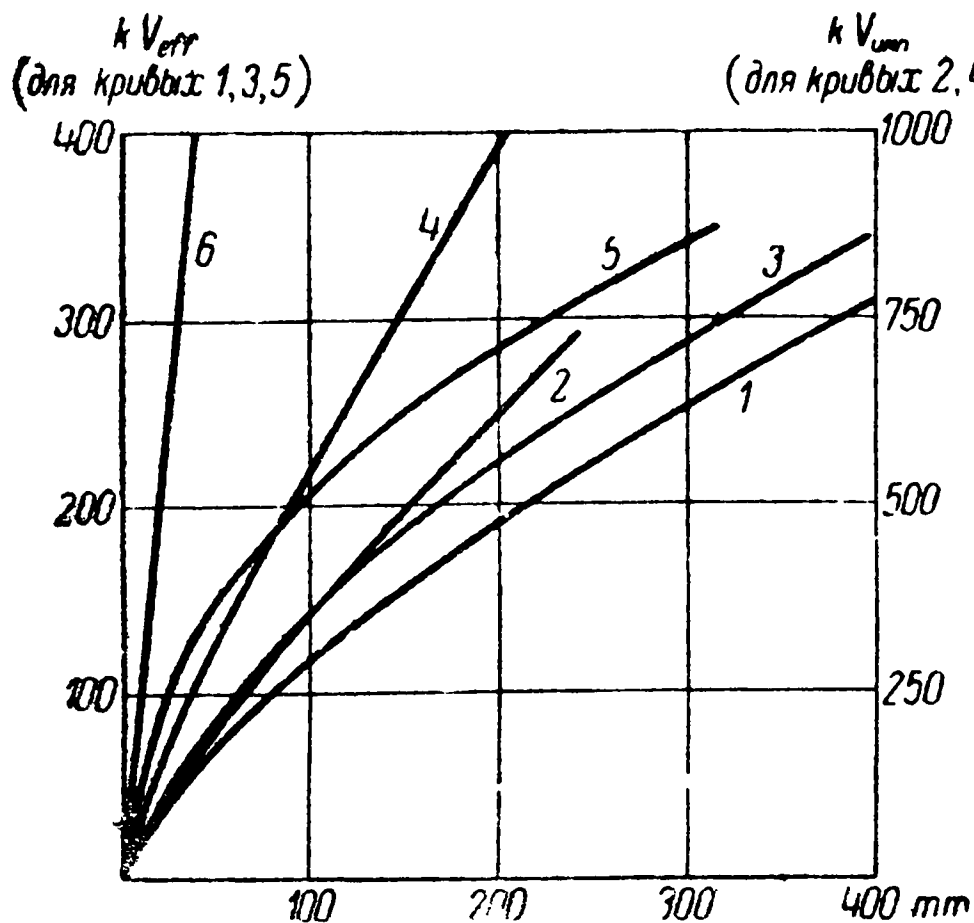


Рис. 103. Пробивное напряжение для масла: кривая 1 — острое и плоскость по данным ВЭИ для технического масла (22 kV) при $+20^\circ \text{C}$, 50Hz и одномоментной методике испытаний; кривая 2 — по Эдвардсу, Гудле и Перри при положительном импульсе на острое; кривая 3 — то же, что 1, но между остриями по Пику; кривая 4 — то же, что 3, но для отрицательного импульса и длины волны в 0,2/20 μs ; кривая 5 — то же, что 1, но между шаром $\varnothing 80 \text{ mm}$ и плоскостью; кривая 6 — то же, что 5, но при импульсах по Эдвардсу, Гудле и Перри.

учитывается практическими формулами вроде формулы Фишер-Хинена (Fischer-Hinpen):

$$g_{пр} = k \cdot \delta_u^{\frac{2}{3}} \quad (79)$$

или формулы Пика (Peek):

$$g_{пр} = A_1 + \frac{A_2}{\sqrt{\delta_u}} \quad (80)$$

Здесь k , A_1 и A_2 — некоторые постоянные.

Для примера можно сравнить данные для пресшпана из табл. 22.

4. Если образец диэлектрика с чистыми поверхностями помещен в таком

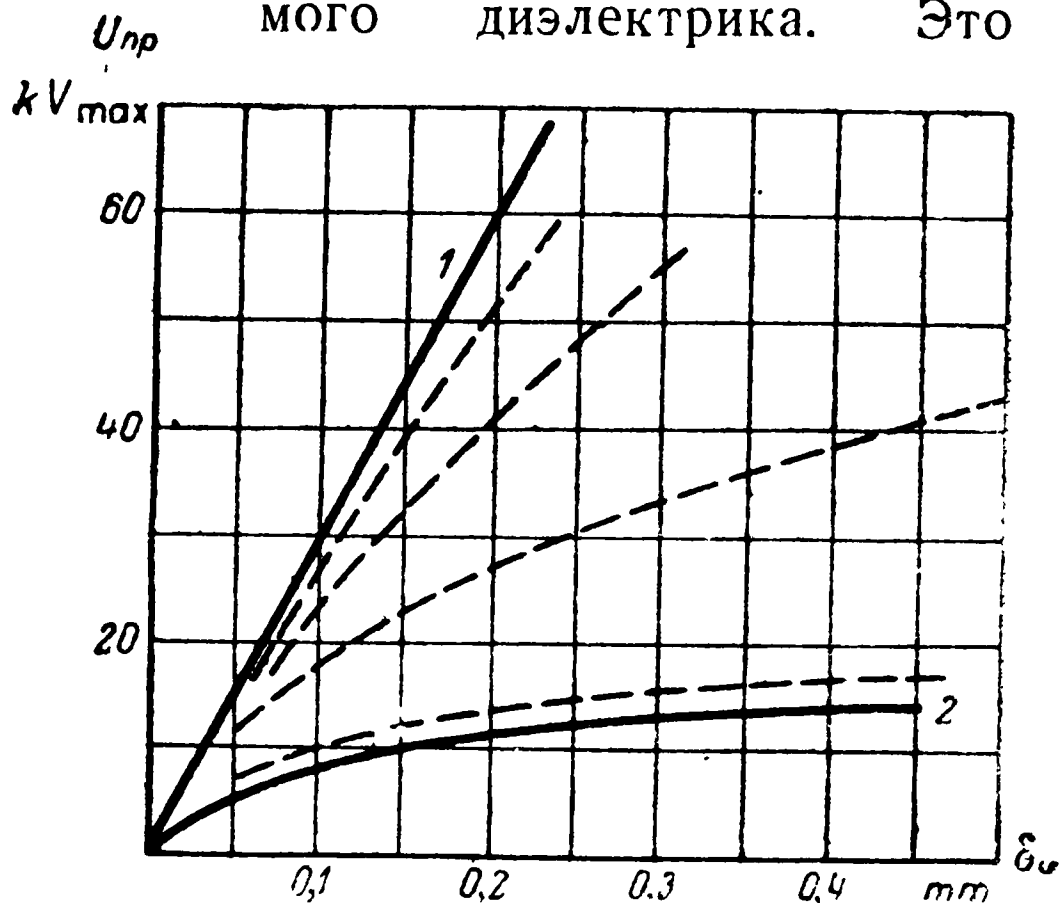


Рис. 104. Пробивное напряжение для фарфора в полях разной неоднородности: кривая 1 — вполне однородное поле; кривая 2 — предельно неоднородное поле.

же трансформаторном масле между электродами так, что однородное поле приложено в направлении поверхности образца, то пробиваться будет или масло, или сам диэлектрик, в зависимости от того, который из объектов обладает меньшей электрической прочностью [Л. 117, стр. 363].

Но в обычных случаях работы изоляции в трансформаторах вышеназванные условия (чистота масла и однородность поля) не бывают соблюдены. Поэтому в случае наличия тангенциальной слагающей напряжения возникают поверхностные, скользящие разряды. Относительно них еще не установлена определенная закономерность. Для приблизительного подсчета величины разрядного напряжения при скользящем разряде

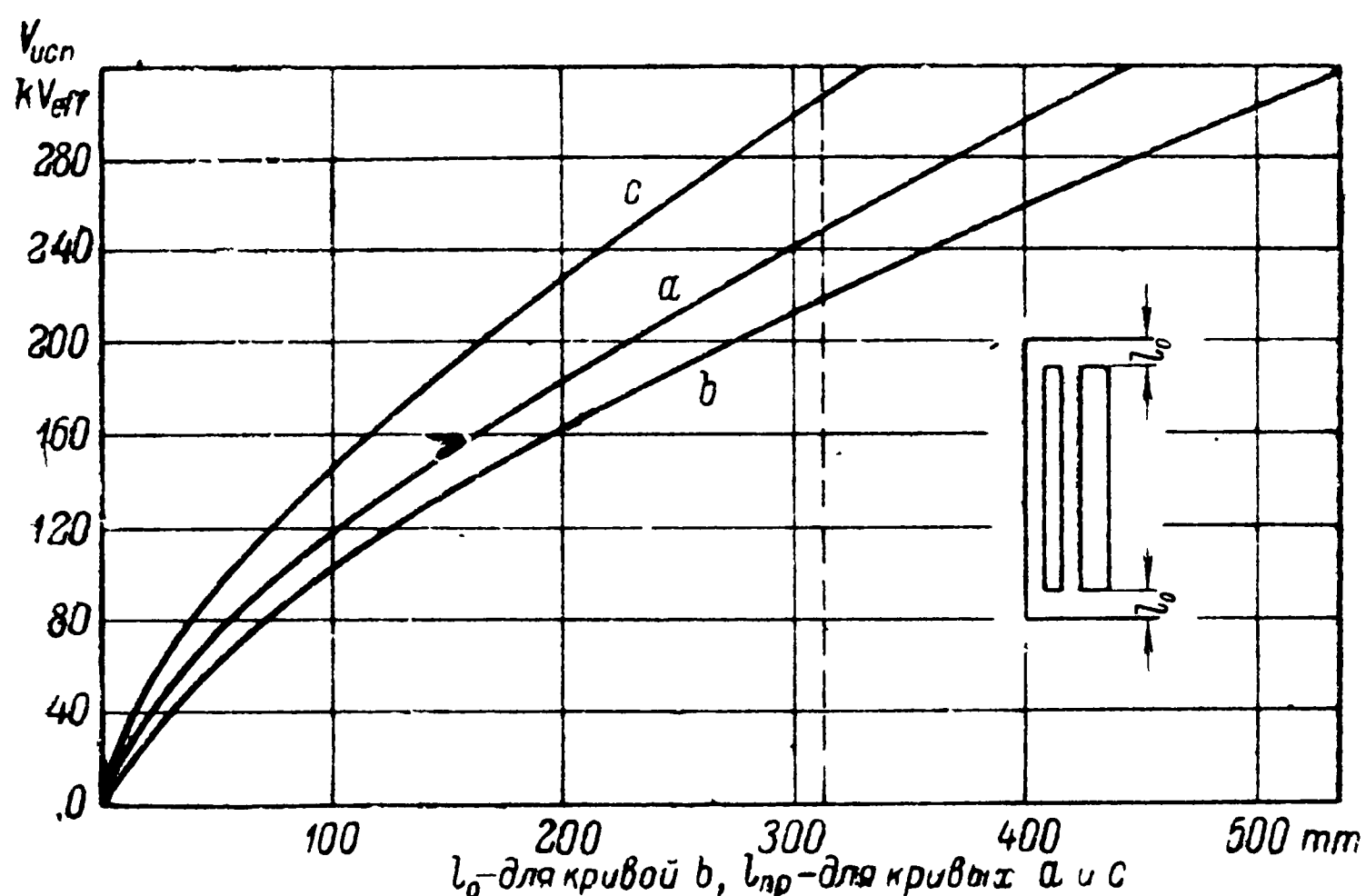


Рис. 105. Кривые для расчета разрядного напряжения по поверхности в масле: кривая a — см. формулу (81); кривая b — по данным АЕГ для расстояния l_0 без угловых шайб; кривая c — для игл в масле.

проф. А. А. Смуров [Л. 120, стр. 159] полагал возможным принимать те же значения, что получаются для игл. Средняя прочность в воздухе при скользящем разряде получается $2 \div 5$ kV/cm, для бакелитовых изделий в масле 7,5 kV/cm (см. там же). Иногда при подсчетах пользуются практическими формулами (строго говоря, относящимися к определенной серии опытов). Такова, например, американская формула, аналогичная формуле (79), а именно:

$$U_{np} = 25 \cdot l_{np}^{\frac{2}{3}} \text{ kV (при 50 Hz).} \quad (81)$$

Здесь l_{np} — пробивное расстояние в сантиметрах по поверхности в масле. Результаты расчета по этой формуле (рис. 105, кривая a) интересно сравнить с данными АЕГ для ярмовых

расстояний l_0 в стержневых трансформаторах без угловых шайб (кривая b) и с кривой c — для игл.

Бумага и дерево в масле сравнительно хорошо выдерживают отдельные поверхностные разряды (без порчи), но в фарфор разряды „въедаются“ и портят его поверхность; в бакелизованной бумаге они иногда даже происходят непосредственно под поверхностью [Л. 121, стр. 217]. Подобных разрядов никоим образом нельзя допускать ни при работе, ни при испытаниях трансформаторов.

5. При применении конструкции с последовательным соединением разных диэлектриков следует помнить, что для двух слоев разных диэлектриков с толщинами δ' и δ'' общее напряжение U в равномерном поле всегда распределится прямо пропорционально толщинам и обратно пропорционально диэлектрическим постоянным ϵ' и ϵ'' .

$$U = U' + U''; \quad \frac{U'}{U''} = \frac{\delta'}{\delta''} \cdot \frac{\epsilon''}{\epsilon'}, \text{ а градиенты будут равны:}$$

$$g' = \frac{U'}{\delta'} = U \frac{\epsilon''}{\epsilon' \cdot \delta'' + \epsilon'' \cdot \delta'}; \quad g'' = \frac{U''}{\delta''} = U \frac{\epsilon'}{\epsilon' \delta'' + \epsilon'' \delta'}. \quad (82)$$

Таким образом, при заданной общей толщине $\delta_u = \delta' + \delta''$ изоляции больший градиент получится в том слое, где ϵ будет меньшим.

При n слоях различной толщины с различными диэлектрическими постоянными градиент в слое k толщиной δ_k с диэлектрической постоянной ϵ_k будет равен:

$$g_k = \frac{U}{\epsilon_k \left(\frac{\delta'}{\epsilon'} + \frac{\delta''}{\epsilon''} + \dots + \frac{\delta^{(k)}}{\epsilon^{(k)}} + \dots + \frac{\delta^{(n)}}{\epsilon^{(n)}} \right)}. \quad (83)$$

6. Продолжительность действия напряжения, приложенного к диэлектрику, является чрезвычайно важным фактором. Различают: длительную, одномоментную и импульсную прочность диэлектриков. Коэффициентом импульса $K_{им}$ называют отношение пробивного напряжения при импульсе¹ к амплитудному значению напряжения частоты 50 Hz, прилагаемому в течение 1 мин. При неоднородном электрическом поле коэффициент импульса зависит от формы поля. Для трансформаторного масла из кривых рис. 106 можно получить значение $K_{им} = 1,6 \div 3$ в зависимости от расстояния между электродами и полярности импульсов. Для изоляции трансформаторов в целом считают $K_{им} = 2,2$.

В однородном поле $K_{им} \approx 1,0$. В некоторых случаях (для грязного трансформаторного масла) $K_{им} < 1$ [Л. 117, стр. 438].

7. Для твердых диэлектриков, в противоположность жидким, весьма заметна кумулятивность действия больших градиентов; каждое такое действие оставляет свой след. Поэтому, например,

¹ При волне определенной формы (§ 56).

без крайней нужды трансформаторы не подвергают повторным высоковольтным испытаниям.

8. При повышении температуры и длительном приложении напряжения, пробивная прочность диэлектриков снижается. Это показывает, например, рис. 107 [Л. 117, стр. 366] для определенного образца фарфора; см. также табл. 22 для пресшпана. Повышение температуры с 20 до 75° С при небольших расстояниях электродов слегка повышает диэлектрическую прочность масла (возможно за счет его подсушивания); при больших расстояниях и том же подогреве прочность при 50 Hz снижается примерно на 15%; при импульсах на 5÷7% — по Гудле (Hoodlet).

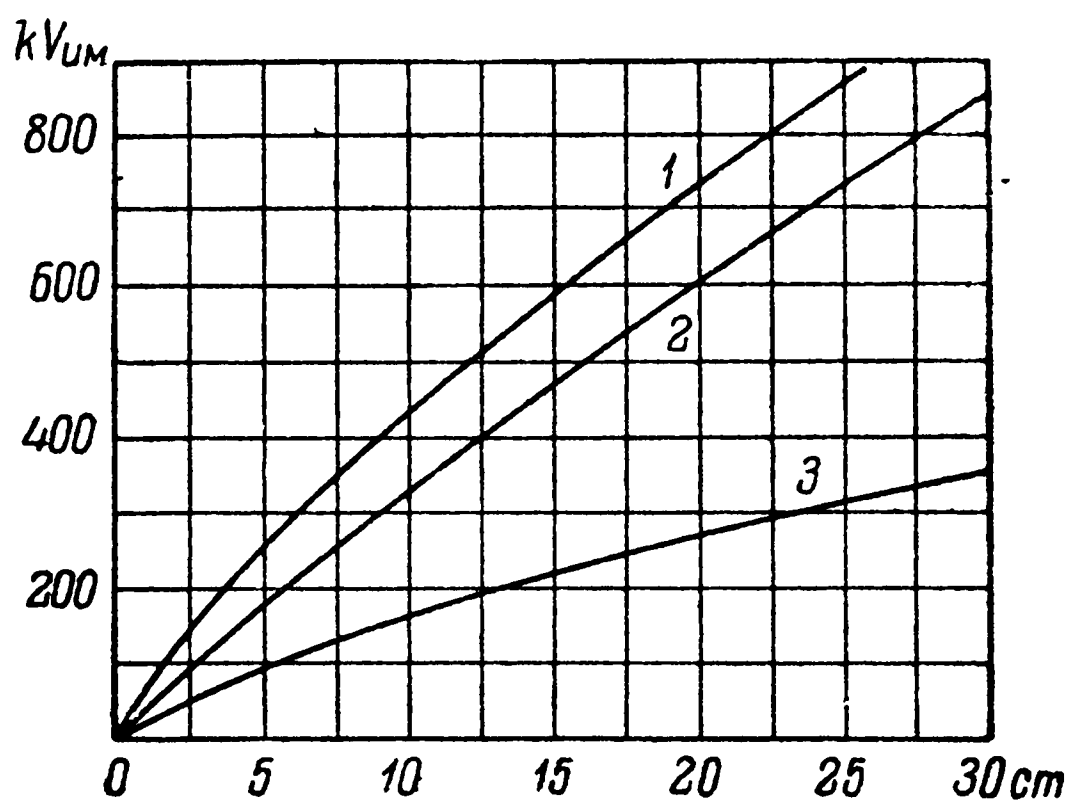


Рис. 106. Пробивное напряжение для масла при импульсах и при 50 Hz: кривая 1 — отрицательные импульсы; кривая 2 — положительные импульсы; кривая 3 — для частоты 50 Hz; электроды — игла и плоскость (по Эдвардсу, Гудле и Перри).

9. Величина диэлектрических потерь в диэлектрике характеризуется тангенсом „угла потерь“ ($\operatorname{tg} \delta$); эта величина в то же время характеризует прочность диэлектриков; последняя уменьшается с увеличением $\operatorname{tg} \delta$ в соответствии с теорией теплового пробоя диэлектриков. Хорошие изолирующие материалы имеют малый $\operatorname{tg} \delta$ (около 0,01 ÷ 0,03). При повышении температуры $\operatorname{tg} \delta$ увеличивается.

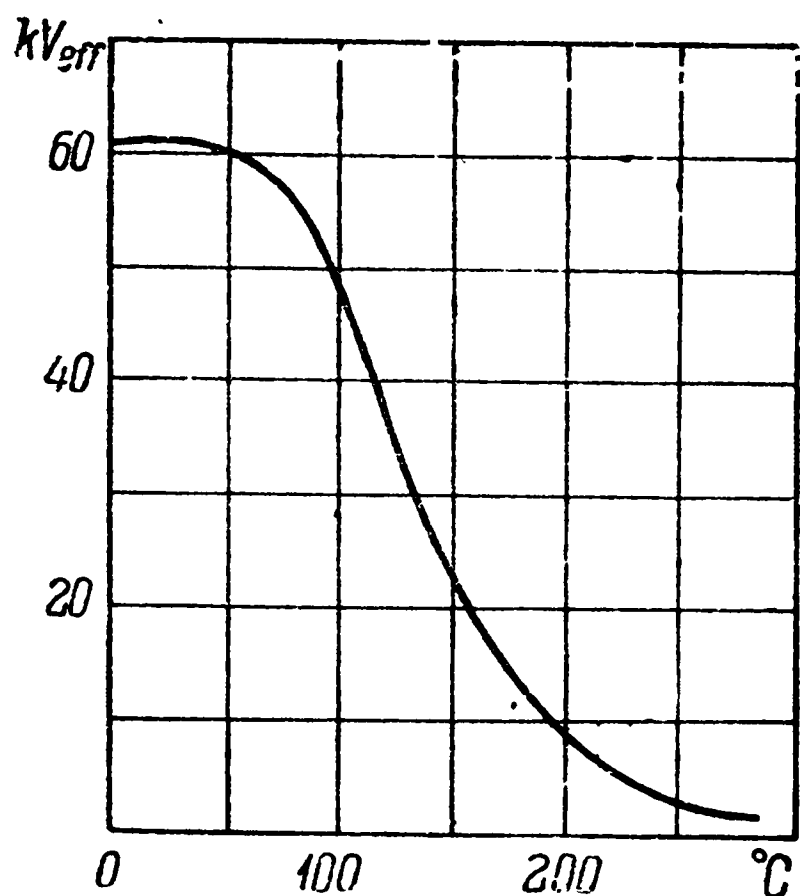


Рис. 107. Пробивное напряжение образца фарфора при разных температурах.

10. Влажность снижает электрическую прочность; см., например, табл. 24 для определенного образца бумаги [Л. 129, стр. 210]. Влияние влаги на масло видно из рис. 100.

11. На электрическую прочность материалов влияют еще многие другие факторы, как то: давление, освещение ультрафиолетовым светом и т. п., что имеет

значение лишь в специальных случаях.

Т а б л и ц а 24

О б р а б о т к а	Пробивное на- пряжение в кило- вольтах
Сушка при 110° С 1/2 часа, потом 3/4 часа — вакуум . . .	1,27
„ „ 110° С	1,25
Пробой при относительной влажности воздуха 36% . . .	1,15
„ „ „ „ „ 75% . . .	1,22
„ „ „ „ „ 85% . . .	0,99
„ „ „ „ „ 100% . . .	0,89

§ 60. Выбор изоляции проводов

Для круглого провода выбирается изоляция соответственно маркам: ПЭБО для диаметров до 1,0 mm и ПББО для диаметров 1,0 mm и более (согласно ОСТ 8616); круглый провод с более сильной изоляцией почти не применяется.

Прямоугольный провод для низших и средних напряжений идет чаще всего марки ПББО; нормальная толщина изоляции на узкой стороне сечения зависит от толщины провода α и составляет 0,5 mm при α до 3,8 mm и 0,55 mm при $\alpha = 3,8 \div 5,5$ mm, считая на обе стороны и учитывая допуск; см. также табл. 16.

Для более высоких напряжений, а также для начальных и конечных катушек выбирается более прочная изоляция (табл. 25).

Т а б л и ц а 25

Номинальное напряжение обмотки в киловольтах	Толщина δ_n изоляции в миллиметрах (считая на обе стороны)		
	промежуточные катушки	начальная и конеч- ная катушки	вторая от начала и вторая от конца катушки
До 6,6	} 0,5 ÷ 0,55 (см. выше)	} 0,5 ÷ 0,55 (см. выше) 1,0 1,4 3 ÷ 4	} 0,5 ÷ 0,55 (см. выше) 1,0 1,4 1,4 ÷ 2
„ 11			
„ 22			
„ 38,5			
„ 121	1 ÷ 2		

Провод марки ПБД для трансформаторов в настоящее время почти не применяется, так как изоляция из ниток не считается достаточной, даже если она пропитывается лаком.

§ 61. Важнейшие изоляционные детали

В соответствии с характером распределения напряжений вдоль обмотки трансформатора (§ 55) вокруг обмоток образуется

электрическое поле, переменное при обычной частоте и имеющее характер импульса при импульсных перенапряжениях. Для примера на рис. 108 представлен вид электрического поля для простой concentрической обмотки стержневого трансформатора, причем рис. 108 *a* соответствует случаю, когда вся обмотка высшего напряжения имеет один и тот же потенциал относительно земли, принятый равным 100 единицам (например, при испытании изоляции трансформатора от постороннего источника напряжения), а рис. 108 *b* — случаю, когда трансформатор работает с заземленной нейтралью, т. е. когда по всей высоте обмотки имеются различные потенциалы относительно земли; оба рисунка представляют лишь схемы, так как для простоты убрана вся главная изоляция, а потенциалы обмотки низшего напряжения и сердечника приняты одинаковыми.

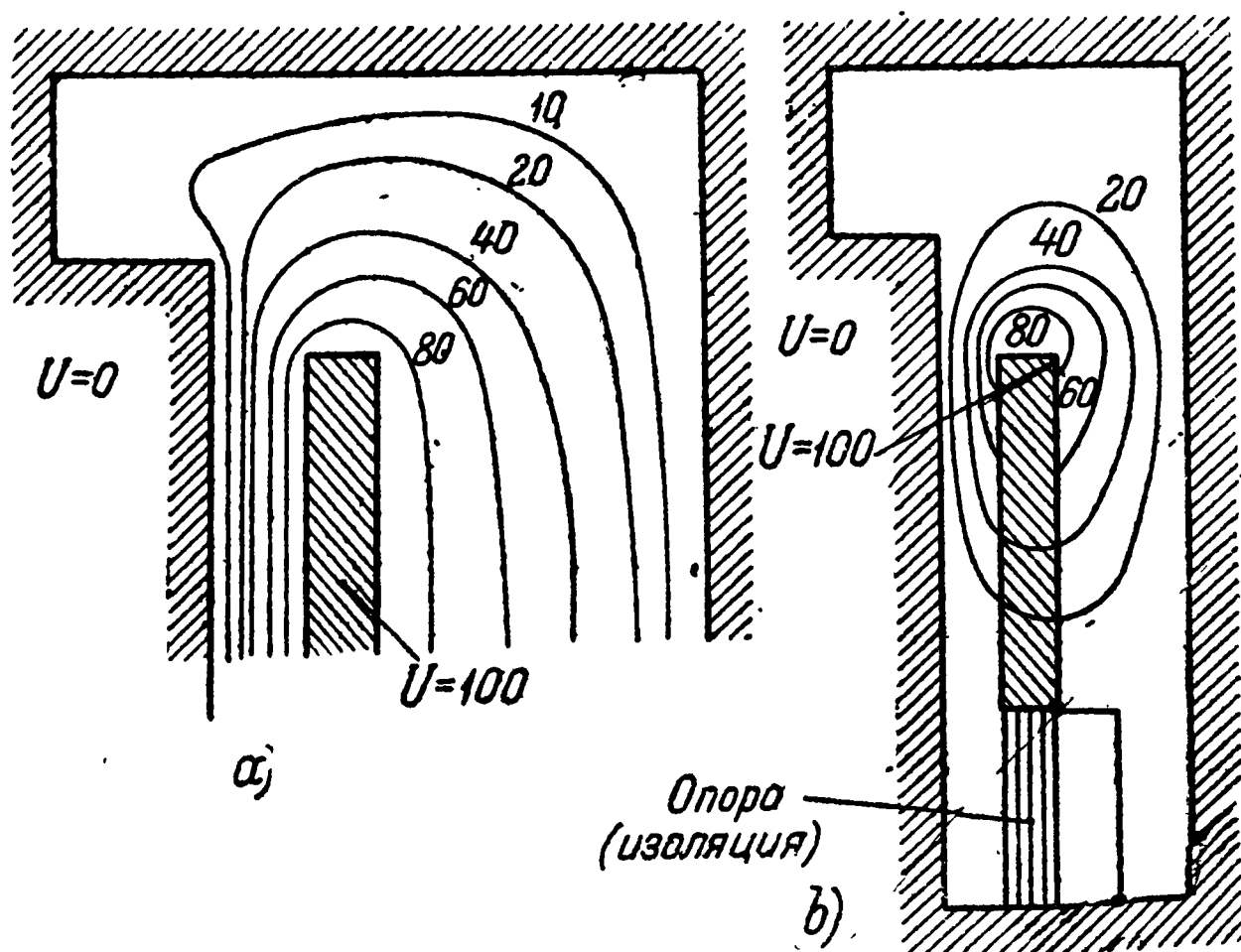


Рис. 108. Электрическое поле вокруг высоковольтной обмотки стержневого трансформатора: *a* — вся обмотка под одним и тем же потенциалом, равным 100 единицам; *b* — трансформатор работает с заземленной нейтралью.

Конструкция и расположение изоляции должны соответствовать картине электрического поля. Так как наиболее вероятным нарушением изоляции трансформатора высокого напряжения является разряд по поверхности диэлектрика, причем в большинстве случаев поверхность эта от разряда страдает (§ 59, п. 4), то правильным решением вопроса о конструкции главной изоляции является размещение ее слоями в направлении эквипотенциальных поверхностей, вследствие чего она будет подвергаться пробивным напряжениям, а не разряду по поверхности.

Таким образом, главная изоляция стержневых трансформаторов с concentрическими обмотками получает вид цилиндров или гильз, а иногда — угловых шайб (см. ниже).

Цилиндры обычно изготавливаются из лакированной бумаги путем навивки ее на полированные оправки при одновременном действии давления и повышенной температуры; гильзы (из пресшпана) накручиваются при изготовлении обмотки или же при сборке всего трансформатора. Толщина цилиндров (2 ÷ 12 mm) выбирается в зависимости от рабочего и испытательного напряжения и от размеров обмотки (табл. 27). Большие цилиндры не делают тоньше 5 ÷ 6 mm, а при толщинах > 12 mm качество

материала получается низким. При высоких напряжениях ставят два, или даже несколько цилиндров.

При напряжениях свыше 38,5 kV кроме цилиндров применяются еще так называемые „угловые шайбы“ (рис. 109), изготовляемые прессовкой из лакированной бумаги или такого же элфантайда (§ 57); пример установки таких шайб см. чертеж IV в приложении и рис. 111.

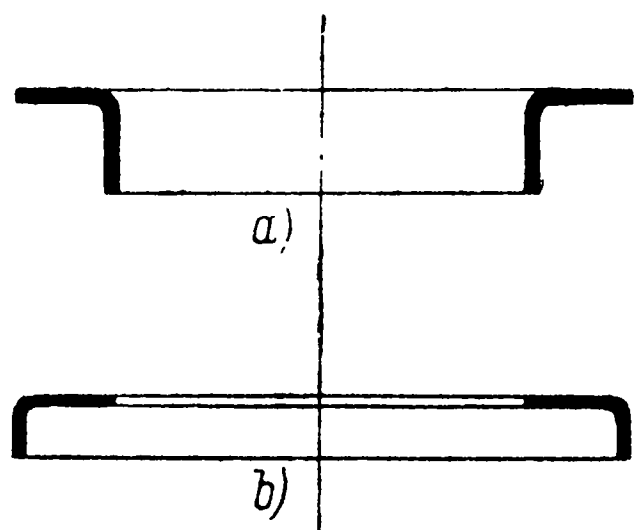


Рис. 109. Типы угловых шайб.

Применением этих шайб, являющихся важнейшей составной частью изоляции, удается значительно снизить изоляционные расстояния (табл. 27). Размеры угловых шайб бывают нормализованы и согласованы с диаметрами цилиндров.

У броневых трансформаторов (кроме типа по рис. 5) главная изоляция соответствует плоской форме прямоугольных дисковых катушек и состоит в основном из шайб (рис. 110a), прямоугольных гильз (рис. 110b) и угловых шайб (рис. 110c). Для образования каналов к шайбам приклеивают или привязывают рейки (рис. 110a).

Для стержневых трансформаторов круглые шайбы образуют основную междукатушечную изоляцию; толщина их 0,5 ÷ 3 mm; для надежности предпочитают ставить две шайбы половинной толщины (табл. 30).

Твердые барьеры могут иметь и иные формы; такова, например, „яровая изоляция“ (детали 12 и 25, чертеж IV в приложении), щиты между наружной обмоткой высокого напряжения и баком и т. п.

Для изоляции отводов применяют изоляционные трубки круглого или прямоугольного сечения, главным образом из бакел

изированной бумаги (если для отводов не применен специальный гибкий кабель с изоляцией, не портящейся в масле). Иногда, при высоких напряжениях, изолировку готовых отводов производят вручную, наматывая бумагу или кембрик слой за слоем в перекрышку до требуемой толщины в зависимости от напряжения токоведущей части и расстояния между ней и заземленными частями (деталь 15, чертеж III в приложении).

К изоляционным деталям можно отнести разные конструк

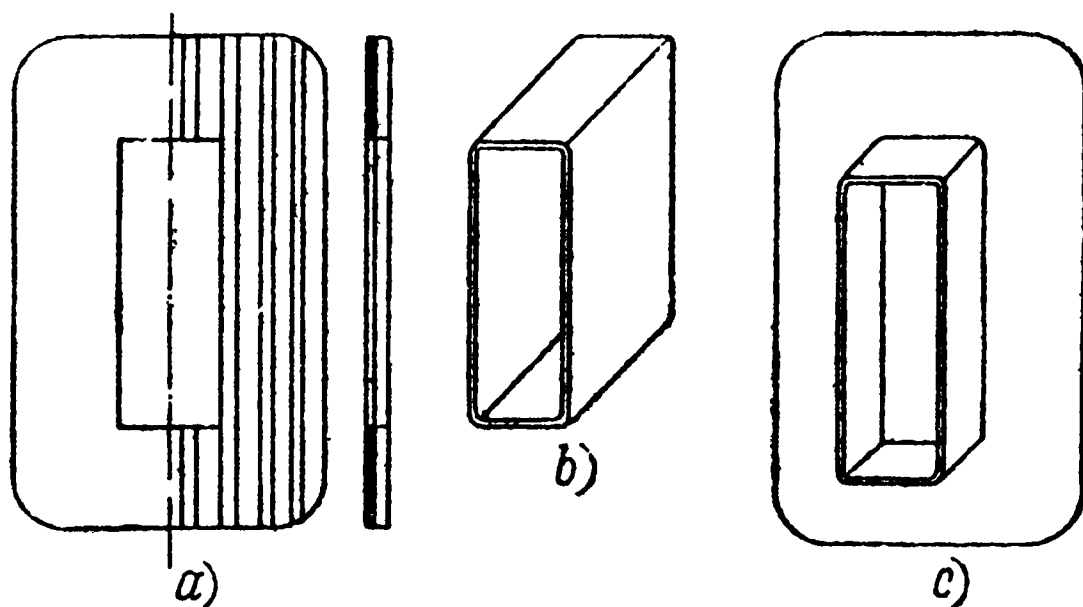


Рис. 110. Главная изоляция высоковольтных броневых трансформаторов: a — шайба, b — гильза, c — угловая шайба.

ционные части из пропитанного дерева: балки ярма (деталь 3, чертеж I в приложении), подкладки, опоры, клинья, рейки и т. д.

На рис. 111 хорошо видно расположение всей изоляции в конструкции ГЕСо для стержневых высоковольтных трансформаторов.

§ 62. Конструкции обмотки и изоляции, предусматривающие борьбу с перенапряжениями

Повышение электрической прочности изоляции трансформаторов достигается рядом мероприятий.

1. Чаще всего применяют усиленную изоляцию начальных витков и катушек. При напряжении до $6,6 \div 11$ kV обычная изоляция на проводе марки ПБД или ПББО достаточна и для начальных катушек, но в них между слоями (при круглом проводе) кладут двойную прокладку $2 \times 0,06$ или $2 \times 0,1$ mm (в промежуточных катушках 0,06 или 0,1 mm). Если для обмотки на 6 kV применяется круглый провод марки ПБД, то 2—3 начальных слоя изолируют добавочно лентой. Изоляция начальных катушек обмоток на более высокие напряжения указана в табл. 25. В дисковых катушках между витками прокладывают иногда добавочно пресшпан или лентероид толщиной $0,3 \div 1,0$ mm.

Нужно, однако, помнить, что добавочная изоляция между витками снижает емкость C (формулы 75 и 76), что ведет к увеличению неравномерности начального распределения напряжения; существует известное оптимальное усиление изоляции, примерно указанное в табл. 25. Напротив, вполне можно рекомендовать применение добавочной междукатушечной изоляции

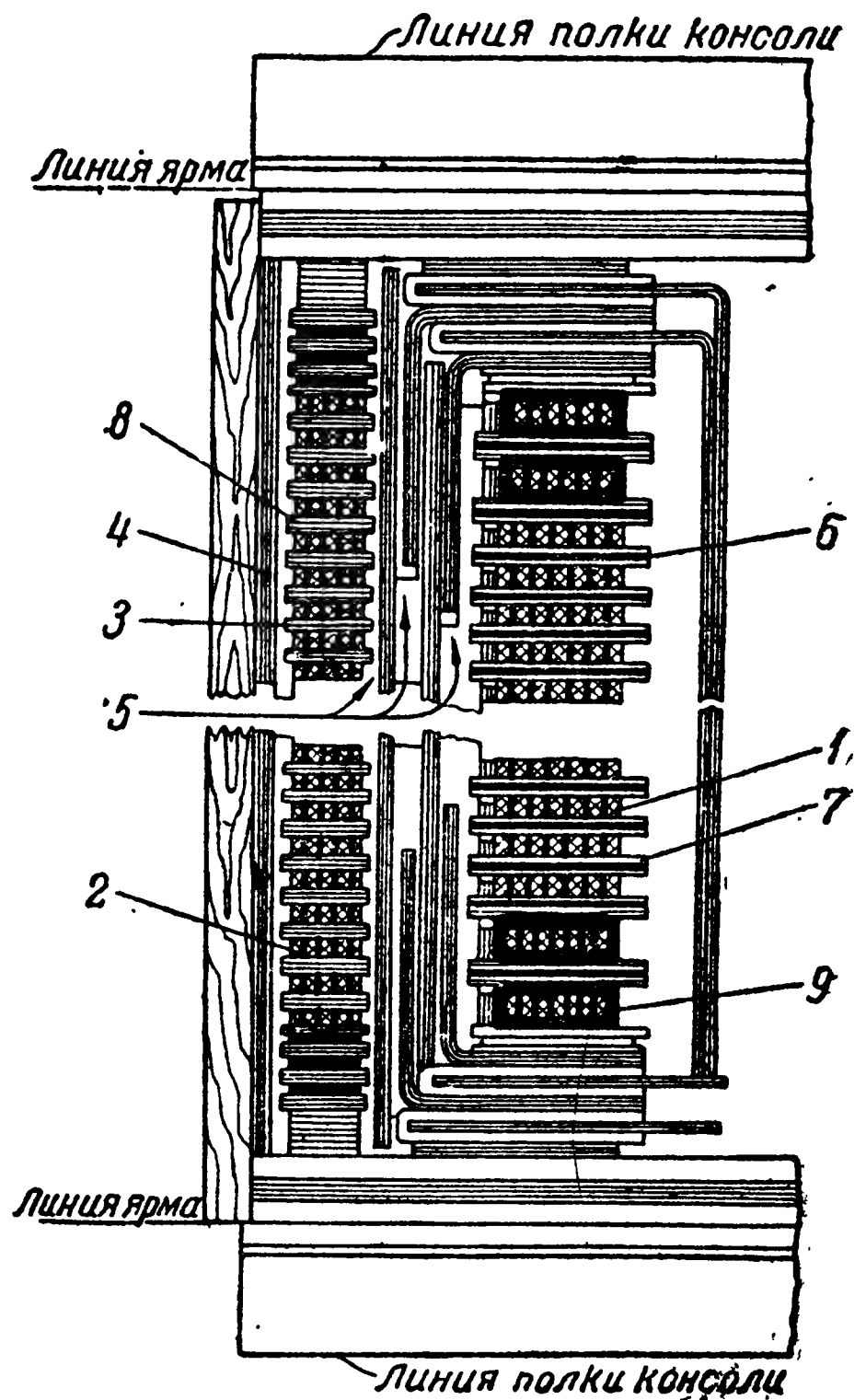


Рис. 111. Расположение изоляции в конструкции ГЕСо для стержневых высоковольтных трансформаторов: 1 — изоляция на проводе обмотки высшего напряжения; 2 — то же, на проводе обмотки низшего напряжения; 3 — охлаждающие каналы; 4 — цилиндр между обмоткой низшего напряжения и стержнем; 5 — главная изоляция трансформатора; 6 — шайбы между катушками обмотки высшего напряжения; 7 — прокладки, образующие каналы между катушками этой обмотки; 8 — то же, для обмотки низшего напряжения; 9 — добавочная изоляция начальных и конечных катушек.

в виде шайб, или же применение добавочной изоляции начальных катушек бумажной или кембриковой лентой. Для примера в табл. 26 приведена толщина изоляции начальных катушек обмотки на 110 kV трансформатора примера 3 (чертеж IV в приложении).

Т а б л и ц а 26

Добавочная изоляция катушки		Изоляция на проводе (считая на обе стороны)
Первая катушка	6,5 mm . .	3 mm
Вторая "	4 " . .	2,4 "
Третья и четвертая катушки	1,5 " . .	1,0 "
Промежуточные катушки	— . .	1,0 "

Обратно, увеличивая изоляцию на проводе (например, в данном случае для промежуточных катушек — до 2 mm), можно

обойтись без шайб между всеми катушками, требующих большой затраты пресшпана и занимающих много места.¹

2. Из формул 75 и 76 вытекает важное следствие. Действие перенапряжений можно снизить, если конструировать обмотки так, чтобы отношение C'/C было по возможности малым; этому способствует, например, выбор сравнительно большого значения отношения размеров β/α провода обмотки.

3. Конструкции, подобные рис. 111, с рационально размещенной изоляцией и правильно выбранными изоляционными расстояниями, несомненно,

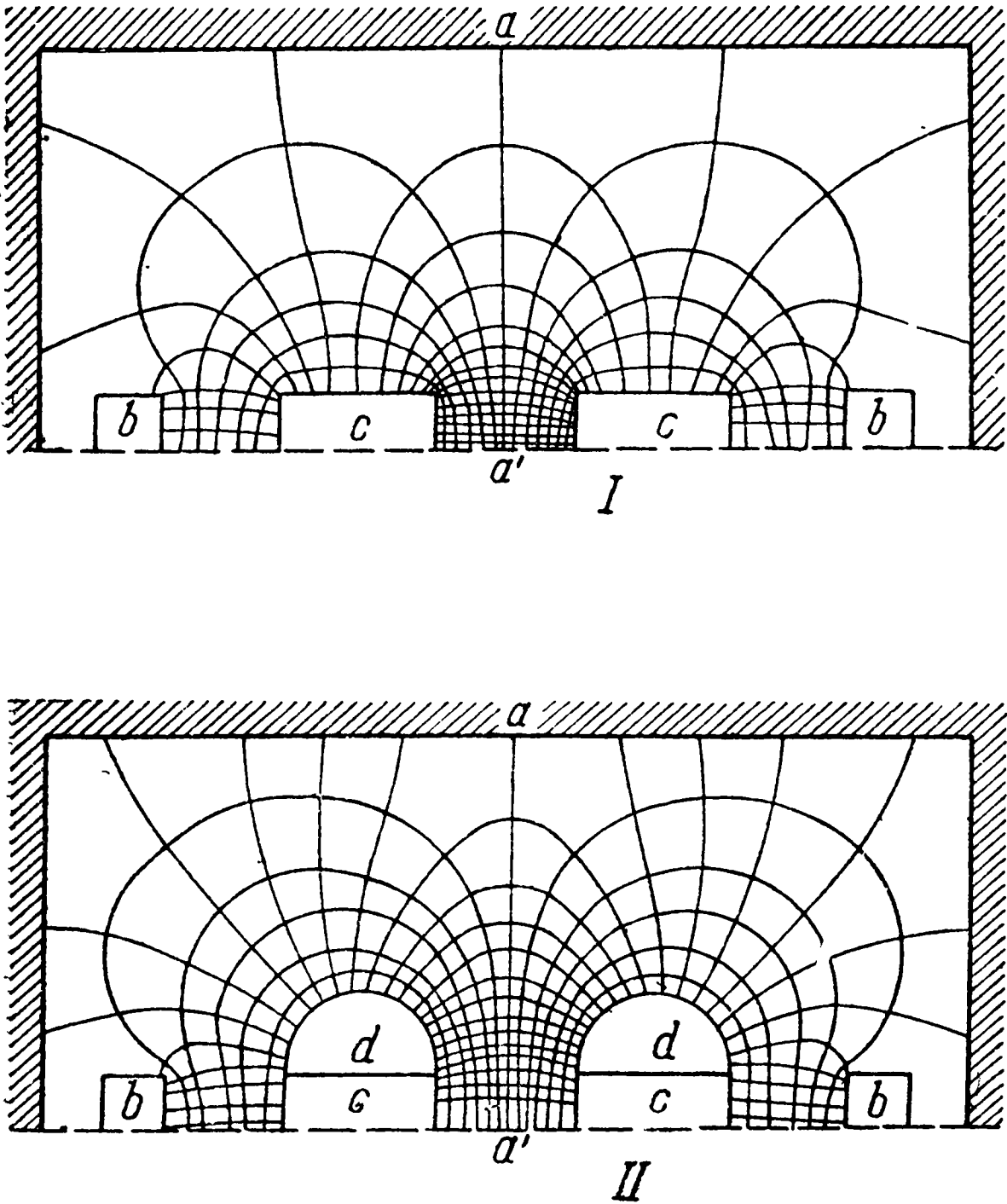


Рис. 112. I — электрическое поле в окне стержневого трансформатора без экранирующих колец: $a - a'$ — ось окна, b — обмотки низшего напряжения, c — обмотки высшего напряжения; II — то же, но с экранирующими кольцами d .

¹ Если каналы приходится делать по обе стороны шайб.

являются одним из мероприятий по борьбе с перенапряжениями.

4. Перенапряжения между начальными витками снижаются благодаря применению „экранирующих колец“.

Это — плоские массивные латунные или бронзовые кольца с разрезом, надежно изолированные (толщина изоляции $3 \div 4$ mm) и наложенные на начальную и конечную катушки обмотки (рис. 112). Кольца соединены соответственно с началом и концом обмотки, однако так, чтобы не образовать активных витков. Кольцо оказывает следующие действия:

а) уменьшает градиент электрического поля в начале и конце обмотки и снижает вероятность пробоев на ярмо (ср. рис. 112, I и 112, II);

б) способствует более равномерному распределению волны перенапряжения между витками первой катушки, благодаря чему между ее витками не образуется чрезмерных разностей потенциалов; на вторую и следующие катушки волна поступает уже со значительно сглаженным фронтом;

с) в случае пробоя с обмотки на ярмо повреждается лишь изоляция самого кольца, но не изоляция обмотки; можно отметить, что аналогичное действие оказывает всякая входная емкость, например емкость конденсаторных изоляторов, но в небольшой степени;

д) производит равномерное нажатие на обмотку при ее пресовке при сборке трансформатора и является надежной опорой против механических усилий (§ 105 и 106).

5. Основная причина появления больших разностей потенциалов между первыми витками обмотки в момент „начального распределения“ перенапряжения лежит (§ 55) в том, что в эквивалентной схеме обмотки (рис. 113) ряд одинаковых емкостей C_1 соединен между собой последовательно при одновременном наличии емкостей C'_1 каждого из элементов обмотки относительно земли, причем все емкости C'_1 можно считать тоже равными между собой.

Напрашивается мысль, впервые высказанная Видом (Weed)

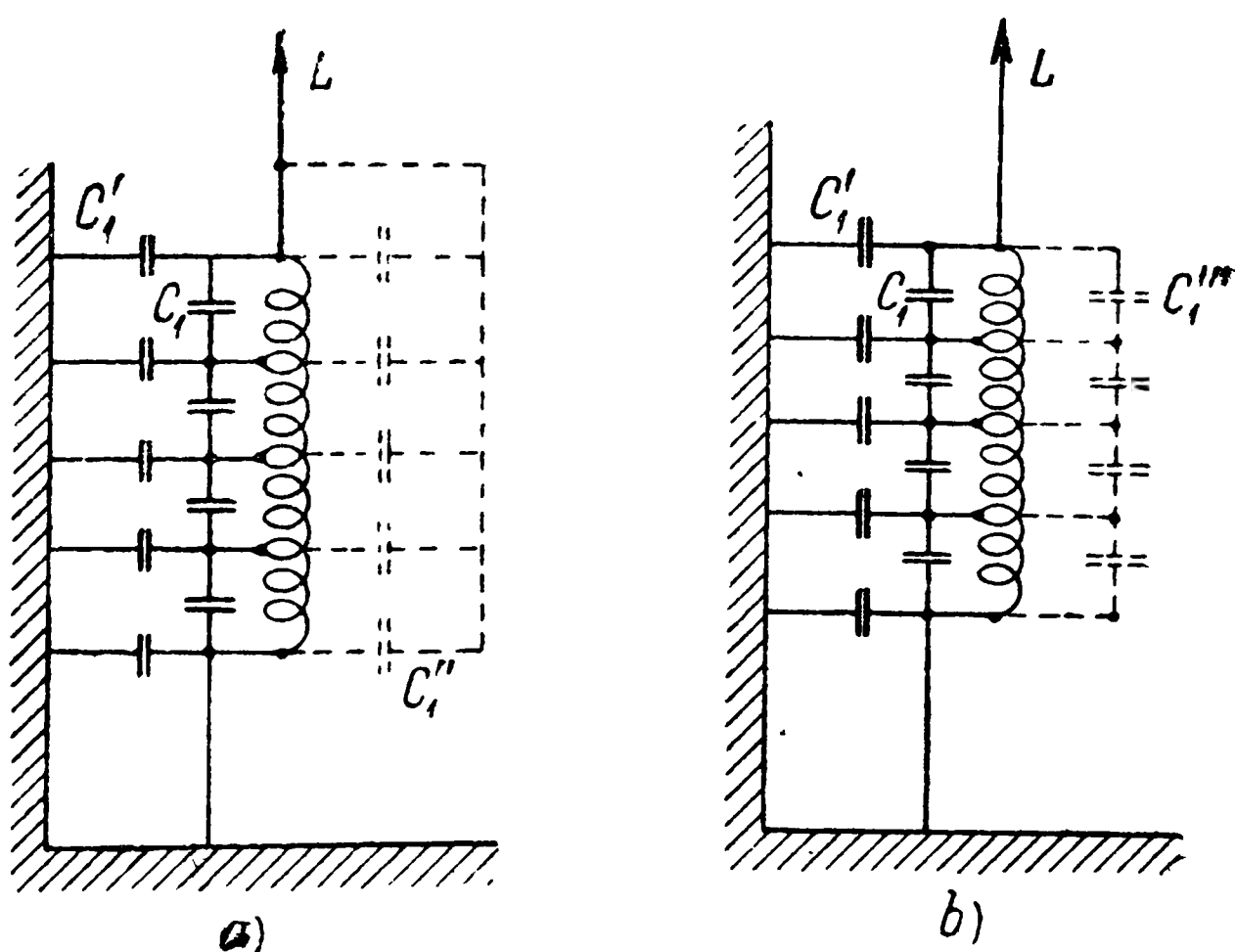


Рис. 113. Эквивалентная схема высоковольтной обмотки трансформатора: а — защита Палуева; б — защита акад. Чернышева.

[Л. 145], о том, что, добавив ряд различных емкостей: C_1'' по рис. 113а или C_1''' по рис. 113б, можно достигнуть того, что в опасный первый момент перенапряжения вдоль обмотки распределится по пунктирной линии (рис. 96), т. е. будет соответствовать „окончательному“ распределению напряжения.

В таком трансформаторе не возникает никаких собственных колебаний, вследствие чего он называется „нерезонирующим“; при условии заземления нуля изоляция трансформатора может быть сделана ступенчатой, ослабляющейся по направлению к нулевой точке. На применении схем рис. 113 основаны емкост-

ные защиты Палуева (рис. 113а) и акад. А. А. Чернышева (рис. 113б). О расчете добавочных емкостей см. [Л. 1, § 99—101].

На рис. 114 представлен нерезонирующий трансформатор конструкции ГЕСО с защитой Палуева; добавочные емкости в виде изолированных колец и экранов охватывают обмотку высшего напряжения. Можно отметить сложность конструкции и необходимость весьма тщательно изолировать от обмотки трансформатора эти кольца и экраны, имеющие потен-

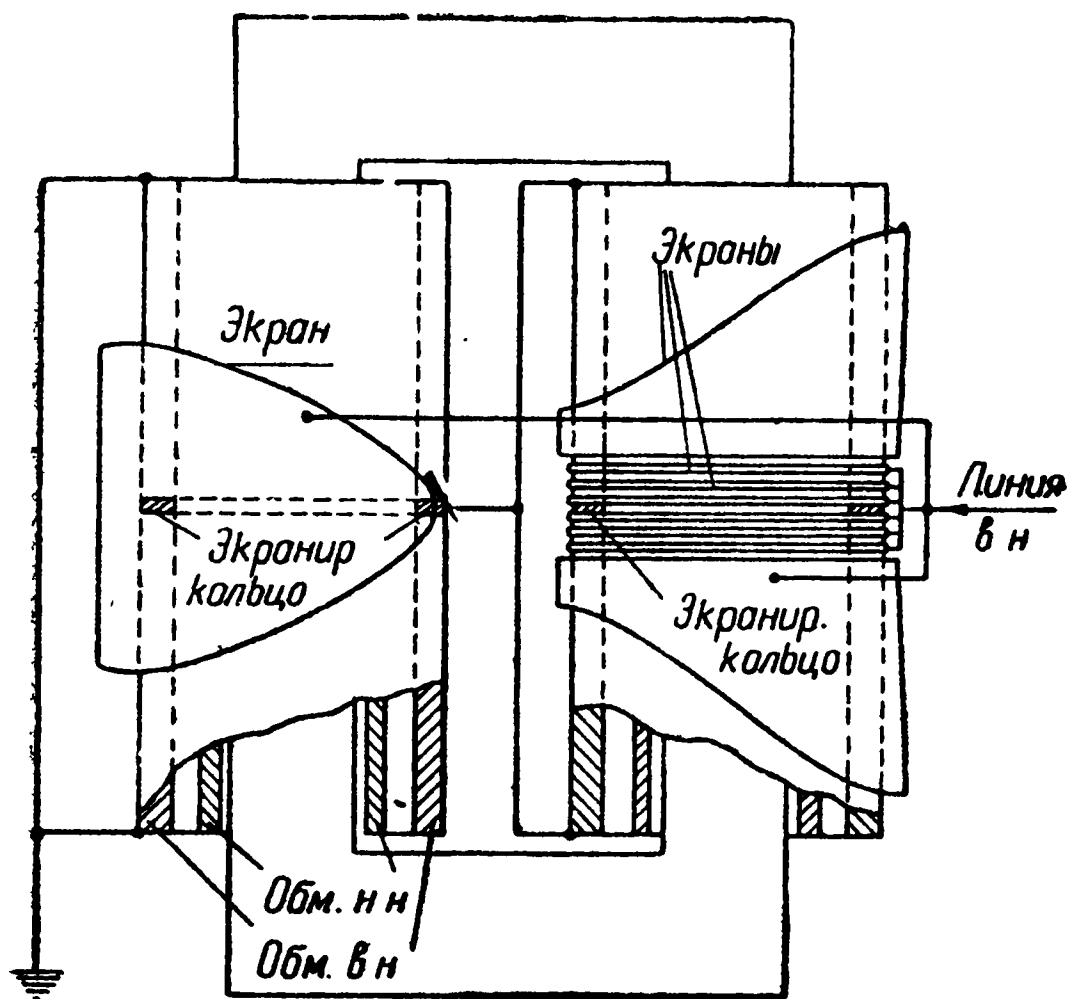


Рис. 114. Однофазный нерезонирующий трансформатор с защитой Палуева (экраны вокруг обмотки).

циал входящей линии. Такого рода защита применяется при напряжениях 110 ÷ 220 kV.

В нескольких словах можно отметить еще следующие мероприятия более общего характера, снижающие перенапряжения и „разгружающие“ изоляцию трансформатора.

а. Заземление нулевой точки, производящееся непосредственно (глухое заземление), или же через сопротивление активное или индуктивное (катушка Петерсена); в первом случае длительное напряжение каждой фазы относительно земли не может превысить фазного напряжения, а возникающие перенапряжения снижаются в $\sim \sqrt{3}$ раз; при этом задача изолировки трансформатора упрощается, и трансформатор получается дешевле на 25 ÷ 30%.¹

б. Заземляющие тросы, протянутые над линией, защищают

¹ Конечно это не значит, что для трансформаторов, например, на рабочее напряжение 110 kV с заземленным нулем можно взять такую изоляцию, которая соответствует напряжению в $\sqrt{3}$ раз меньшему, т. е. примерно 66 kV.

последнюю, а также соединенные с ней трансформаторы от прямых ударов молнии.

с. Ряд устройств внешней защиты трансформаторов преследует цели уменьшения амплитуды фронта волны перенапряжения (разрядники) или же снижения крутизны фронта этой волны — дроссельные катушки, катушки Кампоса (Kampos), Ферранти (Ferranti) и т. п.

д. В последнее время защита трансформаторов достигается методом „координации“ изоляции трансформаторов, т. е. систематическим подбором уровней изоляции всей установки, включая и трансформаторы. Рис.

115 уясняет дело. По оси OX в условных масштабах отложены участки: 1 — линия, 2 — проходные изоляторы масляных выключателей, 3 — внутренняя изоляция масляных выключателей, 4 — проходные изоляторы трансформаторов, 5 — обмотки трансформаторов.

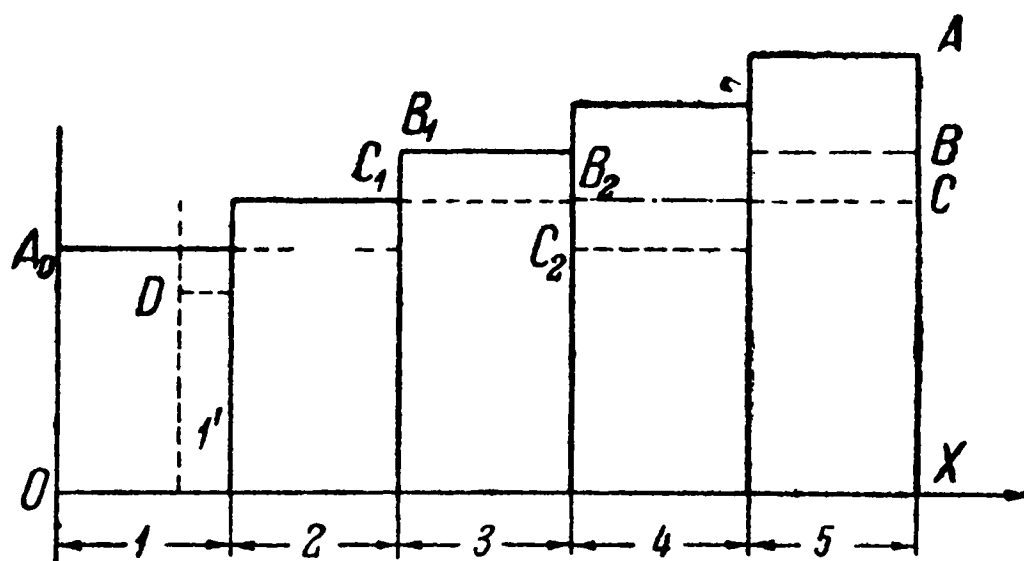


Рис. 115. Подбор уровней изоляции установки высокого напряжения.

Если по мере приближения к трансформаторам постепенно повышать изоляцию, то уровни ее будут соответствовать сплошной линии A_0B_1A , и изоляцию обмоток придется брать излишне высокой. Эту последнюю можно снизить (линия $A_0B_1B_2B$), если допустить „предупредительные разряды“ на проходных изоляторах трансформаторов. Если вдобавок на участке 1' перед подстанцией снизить изоляцию линий, то соответственно можно снизить и изоляцию обмоток (пунктирная линия $A_0DC_1C_2C$).

Вместо снижения изоляции линии перед трансформаторами устанавливают „координирующие“ искровые промежутки, отрегулированные так, чтобы при всяких перенапряжениях промежутки пробивался раньше, чем будут перекрыты проходные изоляторы, или повреждена изоляция трансформатора, которая со своей стороны „координируется“ с величиной упомянутого промежутка. Последнего можно достигнуть, если известны импульсные характеристики $U=f(t)$ как изоляции трансформатора, так и самого промежутка. Об изоляции трансформаторов см. [Л. 130—134]; о координации изоляции см. [Л. 135—140]; о нерезонирующих трансформаторах см. [Л. 1, гл. 12; Л. 141—143].

§ 63. Расчет и выбор важнейших изоляционных промежутков¹

1. Расчет изоляционных расстояний в масле по Рихтеру (Richter) [Л. 20]. Для однородного диэлектрика, например масла, можно принять в известных пределах прямую пропорциональность между

¹ Все промежутки предполагаются в масле; об изоляционных расстояниях в воздухе см. конец этого параграфа.

пробивным напряжением U_{np} и величиной δ_u изоляционного промежутка:

$$U_{np} = \eta \cdot \delta_u \cdot g_{np} \text{ kV}, \quad (84)$$

где g_{np} — пробивной градиент, для технического масла равный 80 kV/cm, а η — коэффициент неоднородности электрического поля; δ_u — в сантиметрах.¹

Кривые рис. 116 дают значения $\eta = f(\delta_u/R)$ для различного расположения электродов. Кривая *a* соответствует взаимному рас-

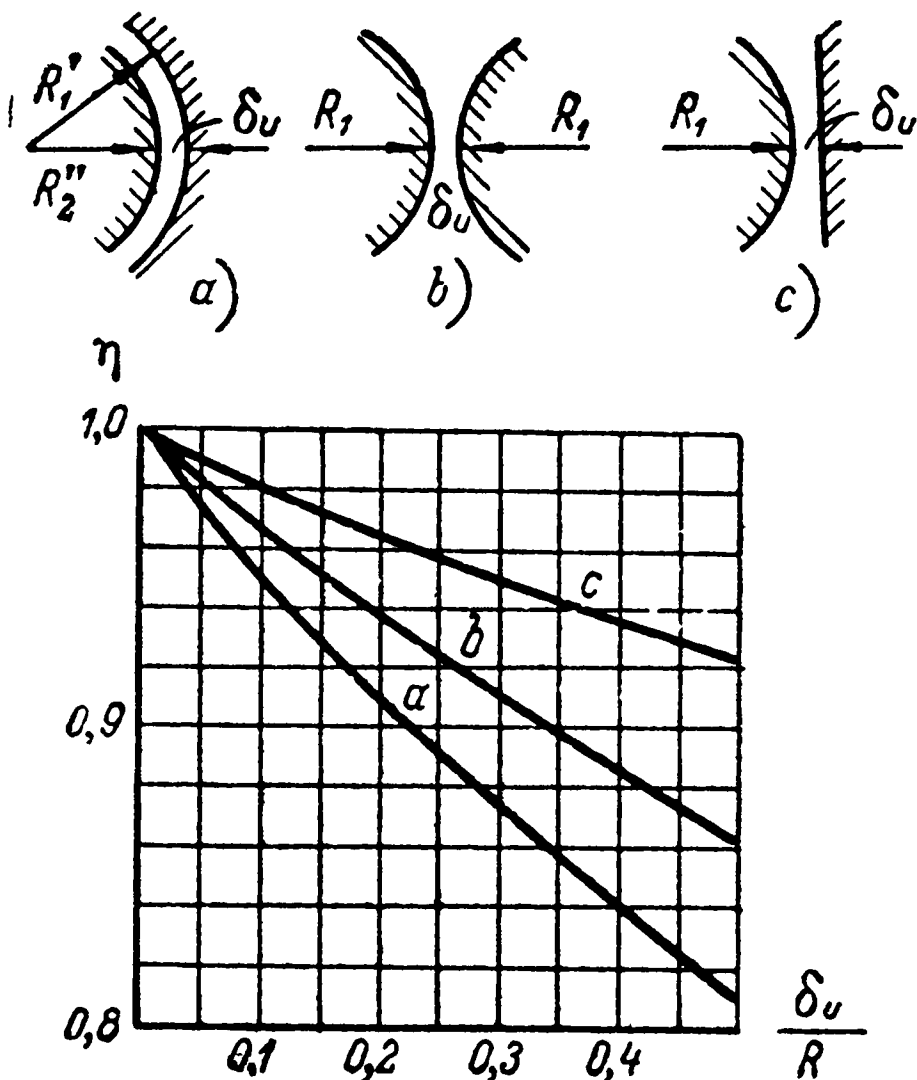


Рис. 116. Значение коэффициента η неоднородности электрического поля в зависимости от формы электродов.

Имея в виду, что толщины δ_u — цилиндра и δ_{mc} — масляного промежутка невелики по сравнению с их радиусами, можно с достаточной для практики точностью пользоваться формулами (82).

Если общий промежуток составляет $\delta_{12} = \delta_{mc} + \delta_u$, то:

$$g_{mc} = U_{исп} \cdot \frac{\epsilon_u}{\epsilon_{mc} \cdot \delta_u + \epsilon_u \cdot \delta_{mc}}$$

или, обозначая $\frac{\epsilon_u}{\epsilon_{mc}} = \alpha$:

$$\begin{aligned} g_{mc} &= U_{исп} \cdot \frac{\alpha}{\delta_u + \alpha \cdot \delta_{mc}} = U_{исп} \cdot \frac{\alpha}{\delta_u + \alpha (\delta_{12} - \delta_u)} = \\ &= \frac{U_{исп}}{\delta_{12}} \cdot \frac{\alpha}{\frac{\delta_u}{\delta_{12}} + \alpha \left(\frac{\delta_{12} - \delta_u}{\delta_{12}} \right)} = \\ &= \frac{U_{исп}}{\delta_{12}} \cdot \frac{\alpha}{\alpha + \frac{\delta_u}{\delta_{12}} (1 - \alpha)} = \frac{U_{исп}}{\delta_{12}} \cdot \frac{\alpha}{\alpha - (\alpha - 1) \frac{\delta_u}{\delta_{12}}} \end{aligned} \quad (86)$$

¹ Ср. с формулой (78).

положению высоковольтной и низковольтной обмоток, кривая *b* — расположению высоковольтных обмоток соседних стержней, а случай *c* — взаимному расположению высоковольтной обмотки и стенки бака.

При расчетах по формуле (84) следует исходить из испытательного напряжения $U_{исп}$ и учитывать коэффициент $\chi = 1,5 \div 2,5$ запаса электрической прочности. Тогда:

$$\delta_u = \chi \frac{U_{исп}}{80 \cdot \eta}. \quad (85)$$

2. Расчет смешанной изоляции в концентрическом расположении (например, изолирующий цилиндр и масляный промежуток между обмотками).

Из этого выражения следует, что для получения возможно меньшего значения g_{mc} , при $\alpha > 1$ ¹ и при заданном δ_{12} , толщину δ_u следует брать возможно малой (см. ниже).

Из равенства (86) имеем:

$$\delta_{12} = \frac{U_{исп}}{g_{mc}} + \frac{\alpha - 1}{\alpha} \cdot \delta_u. \quad (87)$$

Значения диэлектрических постоянных см. в табл. IV в приложении.

Таким образом, задаваясь минимальной толщиной δ_u , допускаемой по механическим соображениям (табл. 27),² можно определить величину необходимого промежутка δ_{12} . При этом g_{mc} есть допускаемый градиент в масле. Если принять опять пробивной градиент $g_{np} = 80 \text{ kV/cm}$, то при запасе прочности χ и коэффициенте η неоднородности поля:

$$g_{mc} = \frac{\eta}{\chi} g_{np} = 80 \frac{\eta}{\chi} \text{ kV/cm}. \quad (88)$$

Например, при $\eta = 0,80$ и $\chi = 1,5$:

$$g_{mc} = \frac{0,8}{1,5} \cdot 80 = 42,5 \text{ kV/cm}.$$

Однако следует всегда помнить, что при образовании в масле проводящих „мостиков“ (§ 58) все напряжение может оказаться приложенным к цилиндру, вследствие чего толщину последнего нельзя брать чрезмерно малой, а еще лучше брать два цилиндра, что и делают для рабочего напряжения в 110 kV (табл. 27); при более высоких напряжениях берут три и больше цилиндров.

Рекомендуемые значения промежутка δ_{12} — основного изоляционного расстояния в трансформаторе — указаны в табл. 27. Как видно, присутствие или отсутствие угловых шайб (§ 61) сильно влияет на выбор не только расстояния l_0 от обмотки до ярма (п. 3), но и расстояния δ_{12} .

Проверяя по выражению (84) получающиеся градиенты для приведенных в табл. 27 изоляционных расстояний, нетрудно найти, что, например, для $U_{исп} = 52 \text{ kV}$ и при $\delta_u = 5 \text{ mm} = 0,5 \text{ cm}$, $\delta_{12} = 13 \text{ mm} = 1,3 \text{ cm}$, $\delta_{mc} = 8 \text{ mm} = 0,8 \text{ cm}$, в масле получится градиент в 49,5 kV/cm, а в цилиндре 24,8 kV/cm без проводящих „мостиков“ и 104 kV/cm — при наличии последних в масле.

3. Расчет ярмовой изоляции. Выбор расстояния l_0 от обмоток до ярма (рис. 105) зависит от того, имеется ли возможность применить угловые шайбы (§ 61) по концам обмотки высшего напряжения стержневого трансформатора или нет. В последнем случае, считаясь с возможностью разряда по поверхности опорной изоляции на ярмо, расстояние l_0 следует выбирать по табл. 27,

¹ Обычно $\alpha > 1$.

² Табл. 27 составлена по данным АЕГ для трансформаторов с масляным охлаждением.

Т а б л и ц а 27

Напряжение вы- соковольтной обмотки в киловольтах		Изоляционные расстояния в миллиметрах							Примечания
номин.	испыт.	δ_{12}	число цилинд- ров	δ_u	l_0	выступ цилинд- ра h_u	между обмот- ками со- седних фаз δ_a	от обмотки до стенки бака	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	21	8 ÷ 12	1	2,5 ÷ 2	20	10	10 ÷ 15	35	Конструкция без угловых шайб " с угловыми шайбами " без угловых шайб " с угловыми шайбами " без угловых шайб " с угловыми шайбами
10	34	10 ÷ 13	1	3,0 ÷ 2,5	22	15	10 ÷ 15	35	
(15)	(44)	12 ÷ 15	1	3,0 ÷ 2,5	25	20	15 ÷ 20	40	
20	52	14 ÷ 18	1	3,5 ÷ 3	30	25	20 ÷ 30	50	
(33)	(73)	22 ÷ 26	1	4 ÷ 3,5	40 ÷ 65	30	28 ÷ 40	60	
35	83	24 ÷ 32	1	5 ÷ 4	75	35	40 ÷ 50	75	
35	83	22 ÷ 28	1	6 ÷ 5	50 ÷ 60	25	35 ÷ 40	75	
(66)	(130)	50 ÷ 55	1	8 ÷ 7	150	100	80	150 ÷ 200	
(66)	(130)	36 ÷ 40	1	9 ÷ 8	70	45	60	150 ÷ 200	
110	208	100 ÷ 120	1	12 ÷ 11	300	200	} См. п. 5	250 ÷ 300	
110	231	60 ÷ 70	2	10	125 ÷ 160	85		250 ÷ 300	

П р и м е ч а н и я

1. Большему размеру δ_{12} соответствует меньший размер δ_u .
2. Размеры δ_u , δ_{12} , l_0 и δ_a указаны наименьшие возможные с точки зрения изоляции; из-за наличия охлаждающих каналов и по другим соображениям размеры эти могут быть увеличены.

столбец 6 (см. также рис. 105, кривая *b*). В случае же установки угловых шайб можно расстояния l_0 сильно снизить, как указано в той же табл. 27.

Для мощных трансформаторов, хотя бы низковольтных, размер l_0 не берут меньше $40 \div 50$ мм по конструктивным соображениям.

Можно добавить, что, как показал Дрейфус (Dreyfus) [Л. 144], нет смысла увеличивать расстояние l_0 , если одновременно не

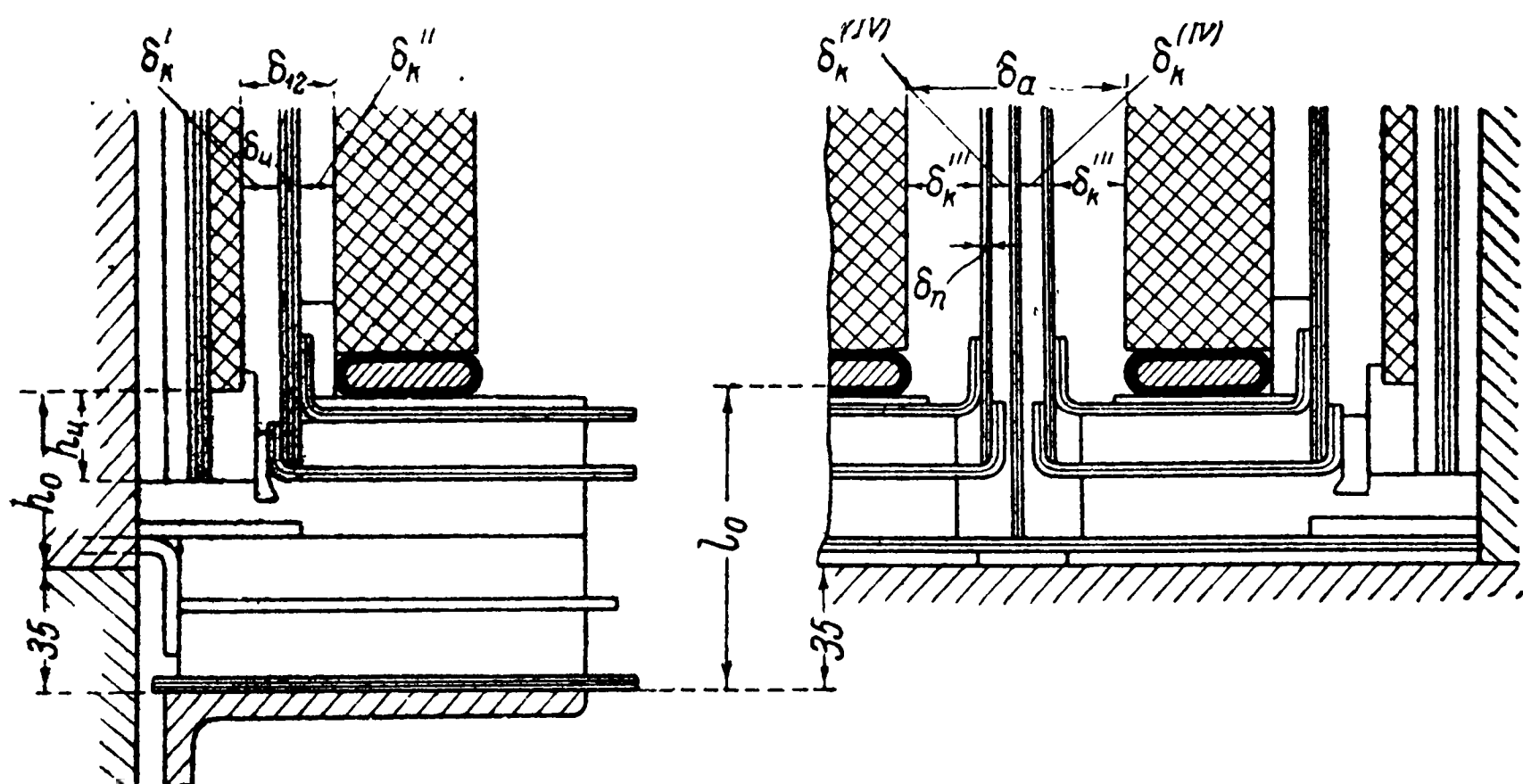


Рис. 117. Конструкция изоляции АЕГ для испытательных напряжений $85 \div 130$ kV.

увеличивать и расстояние δ_{12} , так как пробивное напряжение U_{np} с высоковольтной обмотки на сердечник зависит от обоих этих промежутков, а именно:

$$U_{np} = C \sqrt{\frac{1}{\frac{1}{\delta_{12}} + \frac{1}{l_0}}} \text{ kV}, \quad (89)$$

где $C \approx 38$ при отсутствии твердой изоляции, а δ_{12} и l_0 — в сантиметрах. В этом отношении очень удачна часто применяемая конструкция (чертеж IV в приложении) с увеличением промежутка δ_{12} по концам обмотки (сокращение радиального размера обмотки l). На рис. 117 и в табл. 28 приведены минимальные изоляционные расстояния в миллиметрах в выполнении АЕГ для испытательных напряжений $85 \div 130$ kV при наличии угловых шайб.

Т а б л и ц а 28

$U_{исп}$	δ_{12}	δ_u	δ_k^I	δ_k^{II}	δ_a	δ_k^{III}	$\delta_k^{(IV)}$	δ_n	l_0	h_0	h_u
85÷94	25	6	9	10	60	20	7	2	85	50	25
95÷110	30	7	12	11	60	20	7	2	95	60	33
111÷130	36	8	15	13	60	20	7	4	105	70	42

4. Выступы и острия. Следует всегда помнить, что всякие неровности, выступы и острия на токоведущих частях уменьшают коэффициент η неоднородности электрического поля; см., например, рис. 118, дающий $\eta = f(\delta_u/R)$ для электрода с закруглением радиусом R . Способы расчетов для электродов с острыми краями развиты подробно в работе Дрейфуса [Л. 144], пользующегося методом конформных преобразований; из этой работы и заимствован рис. 118. В высоковольтных конструкциях стараются избегать всяких острых углов и выступов; ср., например, § 62 — применение экранирующего кольца.

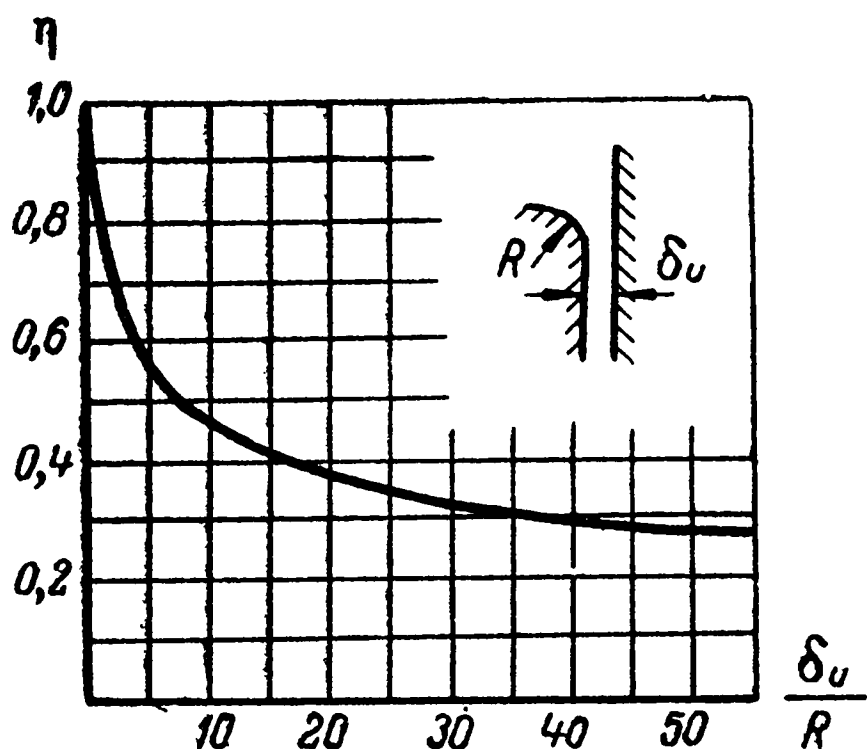


Рис. 118. Значение коэффициента η неоднородности электрического поля вблизи острых краев.

обмоток и от выбранной конструкции щитов между этими обмотками. Вообще берут $\delta_a \approx 1,2 \div 2,0 \delta_{12}$, если снаружи расположены обмотки высшего напряжения, между которыми действует линейное напряжение.

6. Прочие изоляционные расстояния в трансформаторе. Остальные изоляционные расстояния, как то: длина h_u выступающих концов цилиндра (рис. 117), расстояние от обмотки до стенки бака и пр. берутся из табл. 27 и 28. Для выбора небольших изоляционных расстояний в масле между голыми и неострыми электродами служит кривая рис. 119.

Кривые рис. 120 служат для расчета расстояний в масле между изолированными токоведущими частями.

По кривой рис. 121 определяется минимальная толщина твердой изоляции между токоведущими частями (отводами), входящая в счет общего изоляционного промежутка.

При проходе провода мимо конструкционной заземленной детали, с одной стороны, и стенки бака, с другой, изоляционные расстояния выбираются в соответствии с табл. 29 и рис. 122.

5. Расстояние между обмотками соседних стержней. Изоляционный промежуток δ_a между обмотками соседних стержней выбирается в зависимости от напряжения между соответствующими точками соседних

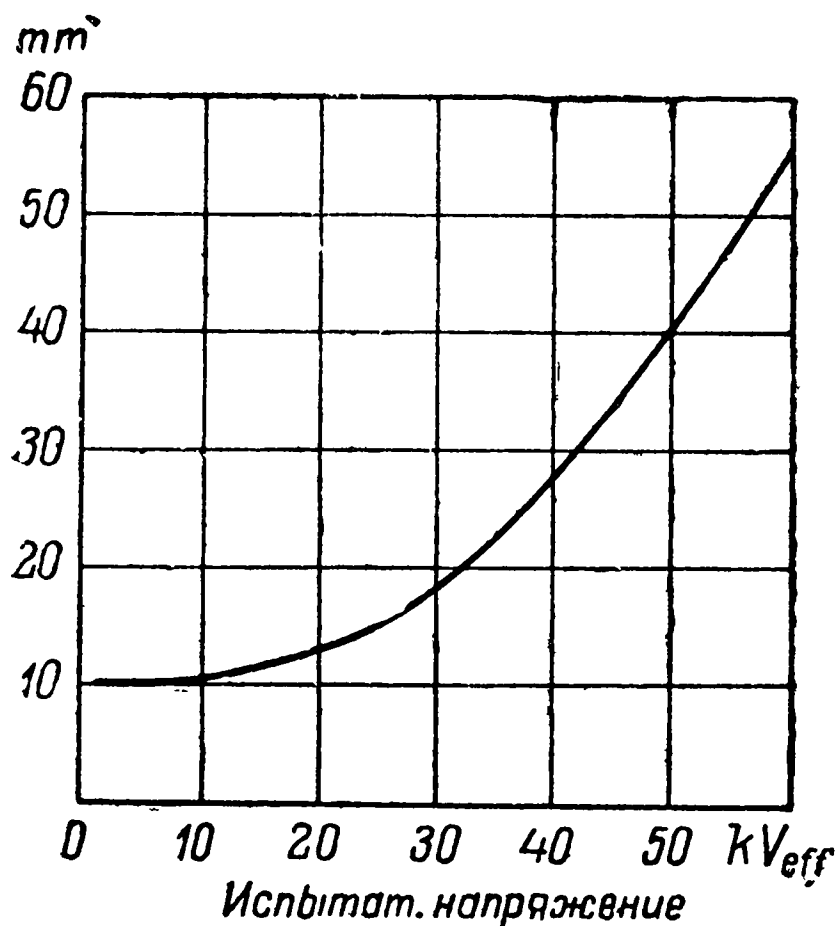


Рис. 119. Изоляционные расстояния в масле (для голых и неострых электродов).

По рис. 123 и табл. 30 выбираются минимальные изоляционные размеры каналов между катушками, если по условиям охлаждения не требуются большие размеры этих каналов.

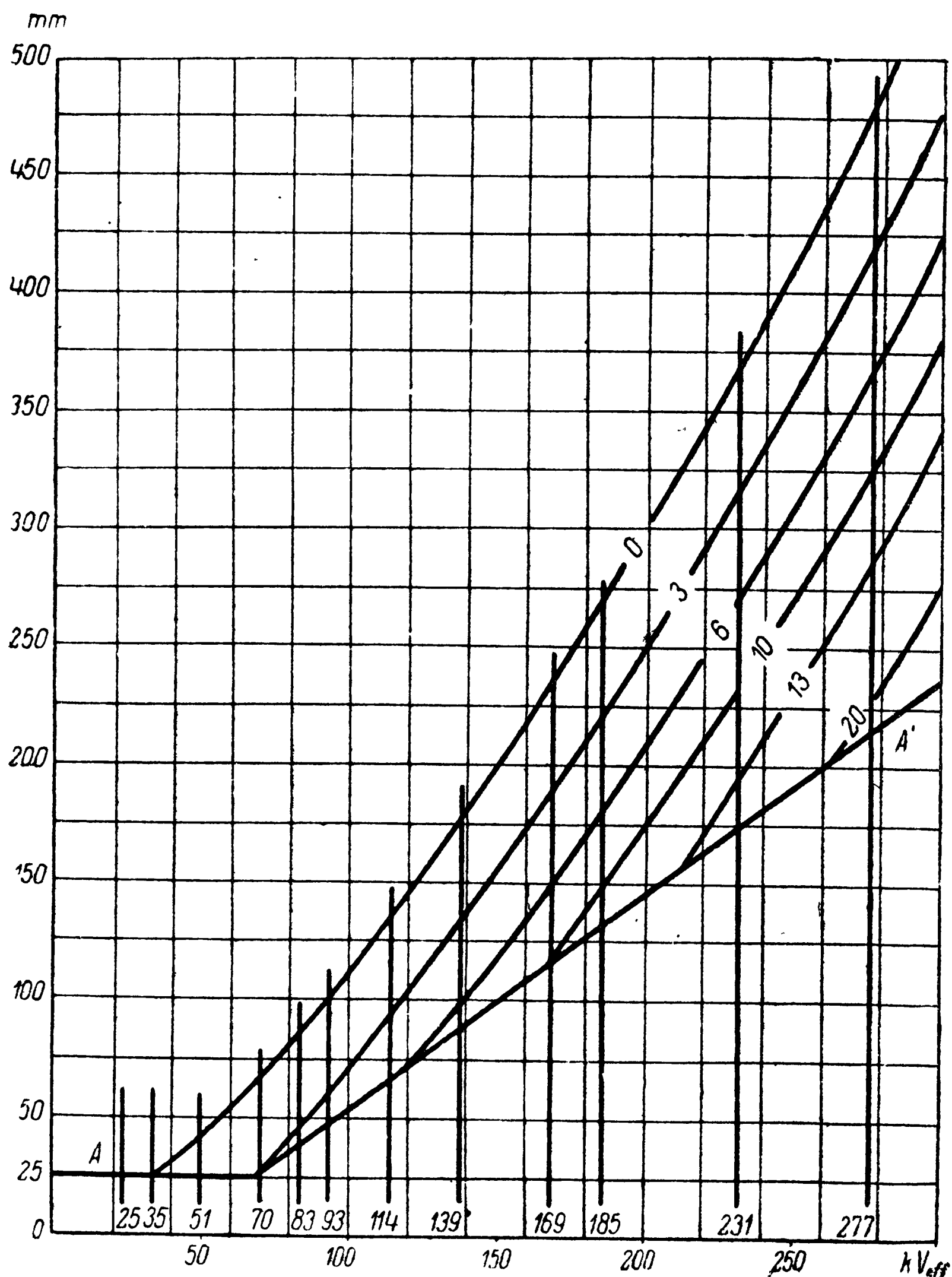


Рис. 120. Изоляционные расстояния в масле между изолированными токоведущими частями в зависимости от толщины твердой изоляции на них в миллиметрах (цифры на кривых). Ломаная линия А—А' — минимальные допустимые расстояния в масле, вне зависимости от толщины твердой изоляции.

Кривые рис. 119—123 и табл. 29—30 взяты из данных МТЗ. При устройстве обмотки по рис. 208 — перенос нулевой точки в середину фазы или размещение там регулирующих витков —

Т а б л и ц а 29

Испытательное напряжение в эффективных киловольтах	Минимальные расстояния в милли- метрах		
	δ_u	δ_b	δ_o
21	3	25	25
34	3	25	25
52	6	35	35
83	8	50	50
231	20	175	110

следует признать разрыву δ_p (рис. 52) достаточные размеры (§ 43, конец).

Величина разрыва δ_p может выбираться по табл. 31 в зависимости от U_p ; U_p — наибольшее напряжение, которое может выдержать на промежуток δ_p при пробе изоляции двойным напряжением при двойной частоте.

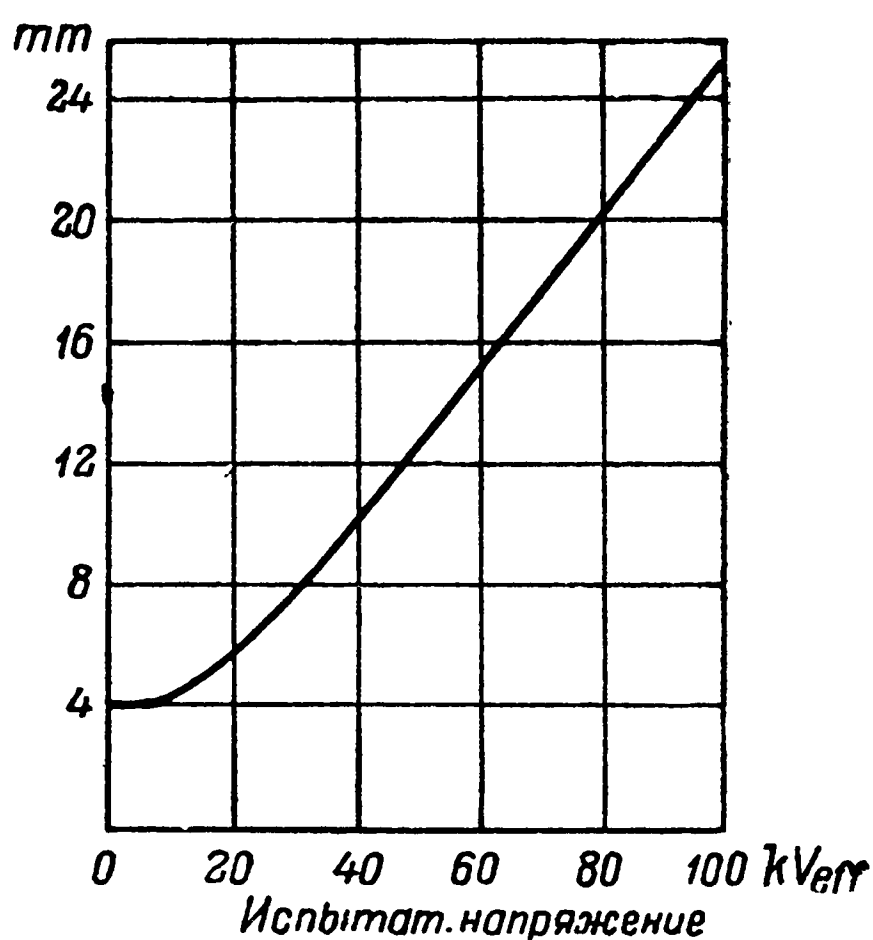


Рис. 121. Минимальная допустимая толщина твердой изоляции между отводами в зависимости от испытательного напряжения между ними.

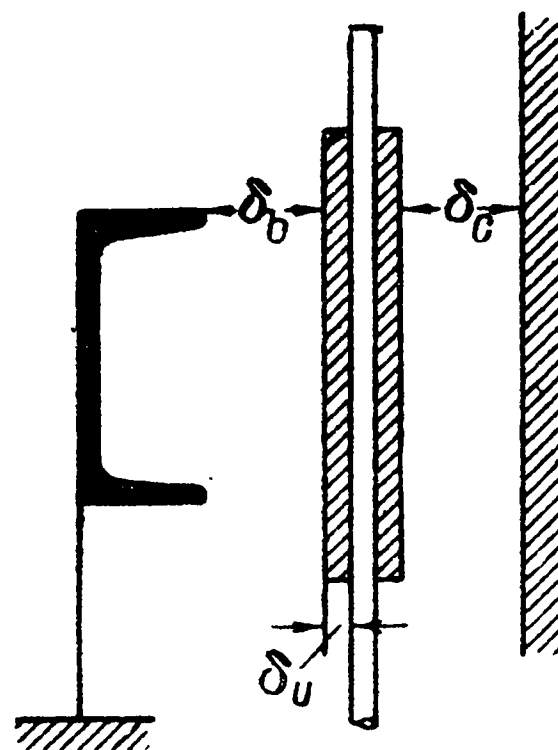


Рис. 122. Изоляционные расстояния (в масле) токоведущей части от заземленной детали и стенки бака.

Если изоляционный промежуток включает в себе путь по маслу δ_{mc} и по поверхности диэлектрика $l_{нов}$, то расчет можно вести по кривым рис. 120, полагая, что общий эквивалентный промежуток равен $\delta_{mc} + k \cdot l_{нов}$, где коэффициент k равен для кабельной бумаги, пресшпана, кембрика и пресбака 0,67, для дерева — 0,4 и для фарфора — 0,5.

Изоляция обмотки низшего напряжения от стержня, от ярма и т. д. выбирается в соответствии с испытательным напряжением

Т а б л и ц а 30

Испытательное напряжение в эффективных киловольтах	№ ри- сунка	Изоляция для промежуточных катушек в миллиметрах			Каналы для начальных и конечных катушек в милли- метрах
		δ_1	δ'	a'	
21	123 <i>a</i> и <i>b</i>	$4 \div 5$	$2 \times 0,5$	$6 \div 8$	На $2 \div 3$ mm больше, чем указано для δ_1
34	123 <i>a</i> и <i>b</i>	$4 \div 5$	$2 \times 0,5$	$6 \div 8$	
52	123 <i>a</i> и <i>b</i>	$5 \div 6$	$2 \times 0,5$	8	
83	123 <i>a</i> и <i>b</i>	$6 \div 7$	$2 \times 1,0$	8	
231 {	123 <i>a</i>	$8 \div 9$	—	—	
	123 <i>c</i>	$12 \div 14$	2,5	Рис. 123 <i>c</i>	

Таблица 31

U_p в эффективных киловольтах	5	10	15	25	35	50	65	85
δ_p в миллиметрах	14	20	25	30	40	55	70	90

этой обмотки. При напряжениях до 500 В между этой обмоткой и стержнем цилиндра не ставят.

Что касается изоляционных расстояний по воздуху, то они берутся в 3÷5 раз больше соответствующих масляных промежутков с учетом расположения установки внутри помещения

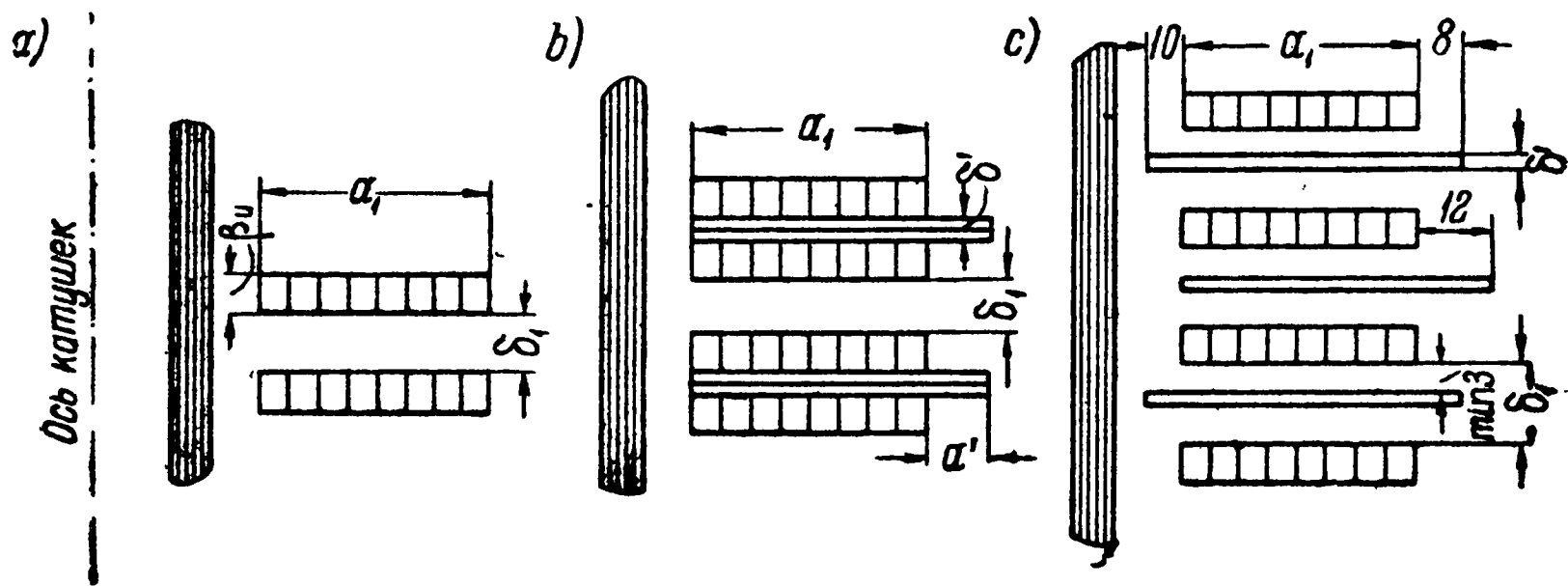


Рис. 123. Минимальные изоляционные размеры каналов.

или на открытом воздухе. Минимальные расстояния между токоведущими и заземленными частями составляют:

При номинальном напряжении до 550 В . . .	35 мм
„ „ „ 551 ÷ 6600 В . . .	100 мм

Для более высоких напряжений берется примерно по $4 \div 4,5 \text{ mm/kV}$ эффективного испытательного напряжения.

Расстояние между ребрами соседних изоляторов берется не менее $\frac{1}{3}$ соответствующего расстояния между токоведущими частями — головками изоляторов.

§ 64. Проходные изоляторы

Эти детали трансформаторов, именуемые иногда выводами, вводами и т. д., правильнее всего называть проходными изоляторами, каковыми они по существу и являются.

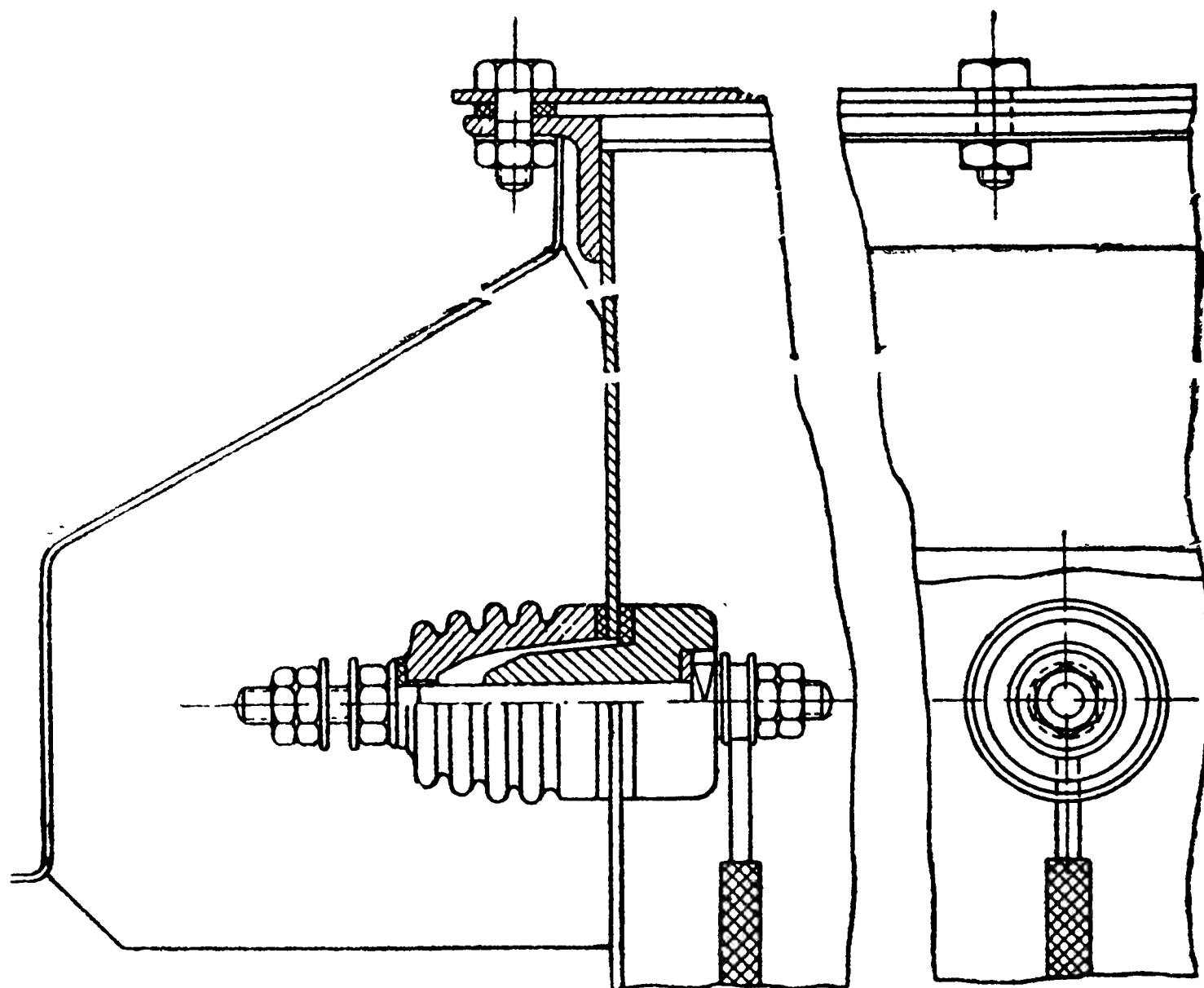


Рис. 124. Установка изолятора на стенке бака.

Назначение их — создание надежного соединения между обмоткой трансформатора и подводимой к нему линией, для чего служит токоведущий стержень изолятора, и создание достаточной

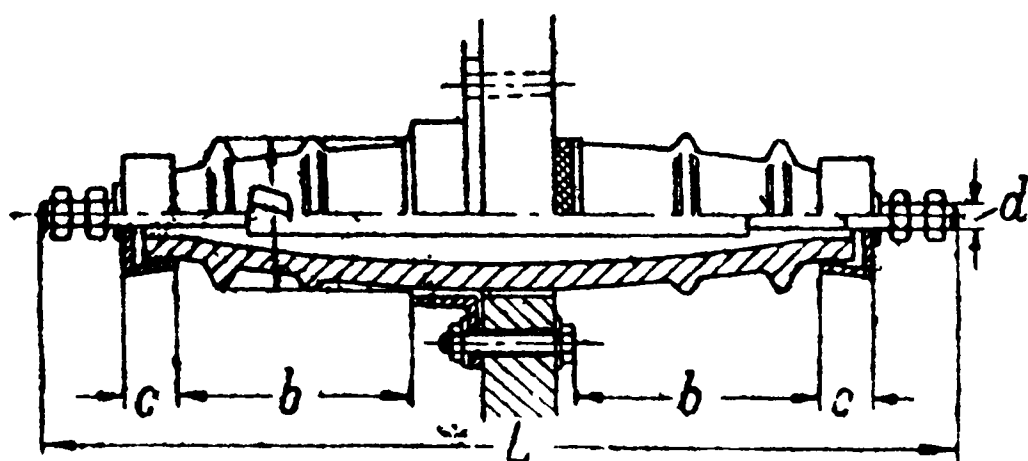


Рис. 125. Основные размеры проходных изоляторов.

изоляции этого стержня от крышки или стенки бака (в зависимости от того, где изолятор установлен). При установке на крышке изолятор вмазывается на глете или цементе в специальный фланец, монтируемый на крышке трансформатора на маслоупорной прокладке из резины или пробки (чертеж III в приложении); у мелких трансформаторов изоляторы вмазываются иногда прямо в крышку, что, конечно, затрудняет замену изоляторов. Во втором случае (рис. 124) изолятор монтируется непосредственно на стенке бака с уплотнением маслоупорными прокладками.

Таблица 32

Номинальные напряжения в киловольтах	Размеры в миллиметрах				Примечания
	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>D</i>	<i>L</i>	
1	46	30	80	385	Рис. 125
3	80	30	90	460	
6	103	30	98	500	
10	132	35	105	585	
20	190	40	120	720	
35	295	45	155	850	
110	1000 ¹ 640 ²	430	350	2650	Рис. 127
220	2000 ¹ 1070 ²	600	700	4420	

Размер *d* для токов до 600 А составляет 7/8".

Табл. 33 дает диаметры и материал токоведущего стержня для разных токов.

Таблица 33

Номиналь- ный ток в амперах	Стержни				Гайки
	диаметр		нарезка	материал	
	дюймы	миллиметры			
До 50	1/2	12	Витворта или метри- ческая	Железо	Латунь
51 ÷ 160	1/2	12		Латунь	"
161 ÷ 275	1/2	12		Медь	"
276 ÷ 400	5/8	16		"	"
401 ÷ 600	3/4	20		"	"
601 ÷ 800	1	26		"	"
801 ÷ 1200	1 1/4	32		"	"

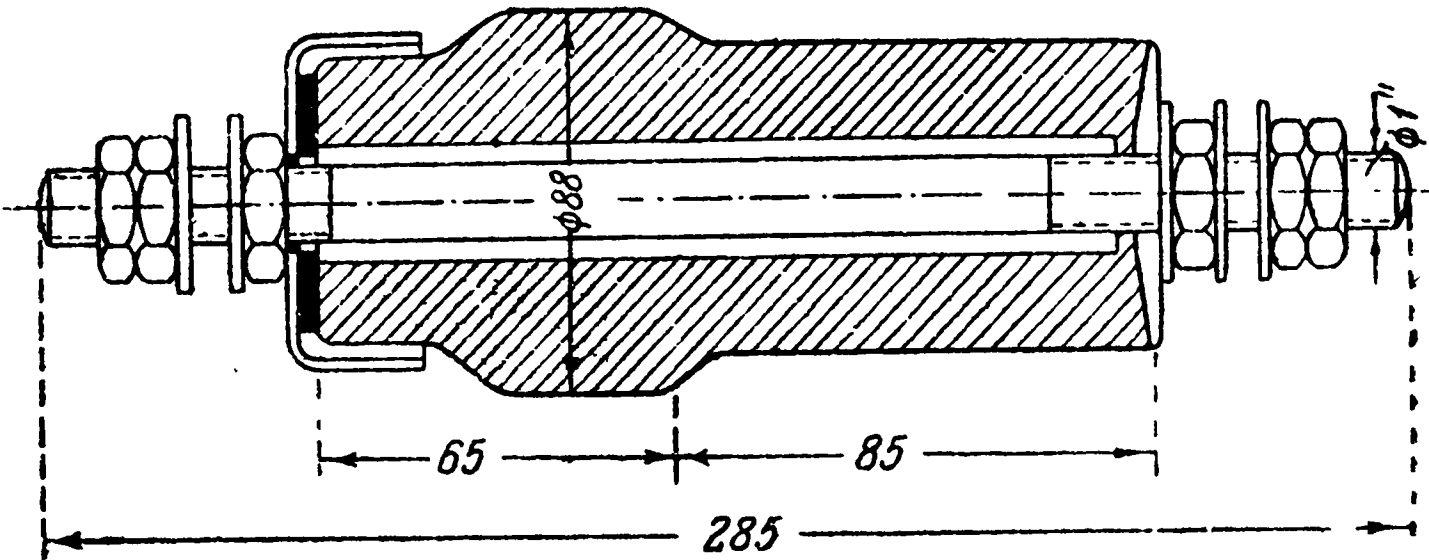


Рис. 126. Проходной изолятор до 1000 V, 800 А.

На рис. 125 и в табл. 32 даны основные размеры изоляторов, устанавливаемых на крышке трансформатора; на рис. 126 изображен изолятор на напряжения до 1000 V, 800 А. Все эти изо-

¹ Наружная часть изолятора (в воздухе).
² Внутренняя часть изолятора (в масле).

ляторы предназначены для внутренних установок; изоляторы для наружных установок см. чертеж III в приложении.

Начиная с токов 600 А токоведущий стержень устраивается для присоединения наружных шин. Для напряжений 20 и 35 kV непосредственно на токоведущий стержень надевается добавочная трубка толщиной 5÷10 mm из бакелизованной бумаги. Изоляторы на 110÷220 kV имеют усложненную конструкцию и заполнены маслом. Такой изолятор применяемого в СССР типа изображен на рис. 127. Гибкий токоведущий провод проходит снизу сквозь внутреннюю трубку и присоединяется на самом верху изолятора. На изоляторе имеется стеклянный сосуд, играющий роль расширителя для масла, заполняющего изолятор и не имеющего сообщения с маслом внутри трансформатора.

Другие типы изоляторов см. [Л. 24, табл. XXXVIII и XXXIX]. Конденсаторные изоляторы имеют преимущество сравнительно малого диаметра при высоких напряжениях, но мало применяются из-за дороговизны и возможности проникновения в них влаги. Для наружных установок они не применимы без фарфоровой рубашки; для таких установок все фарфоровые изоляторы обязательно снабжаются выступающими поперечными ребрами, так называемыми „юбками“ (минимум одна для низких напряжений). Для трансформаторов, работающих в шахтах, на морском берегу и т. п., где можно ожидать больших осадков сырости или соли на изоляторах, предпочитают вместо последних устанавливать на стенке бака кабельную муфту со специальным присоединением сквозь стенку бака (рис. 128).

Для трансформаторов с воздушным охлаждением, при сравнительно низких напряжениях, отводы от обмоток укрепляют на небольших опорных изоляторах на соответствующее напря-

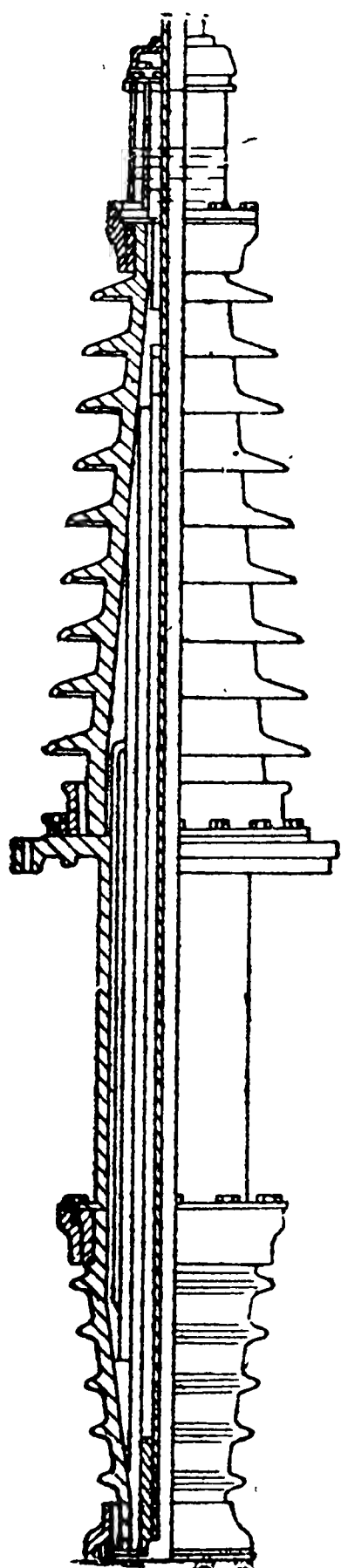


Рис. 127. Масло-наполненный проходной изолятор на 110 kV.

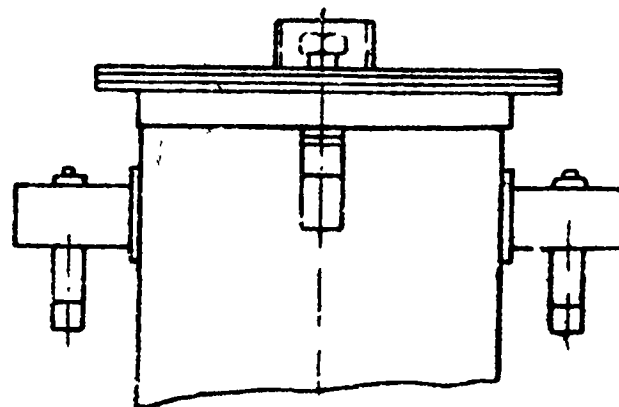
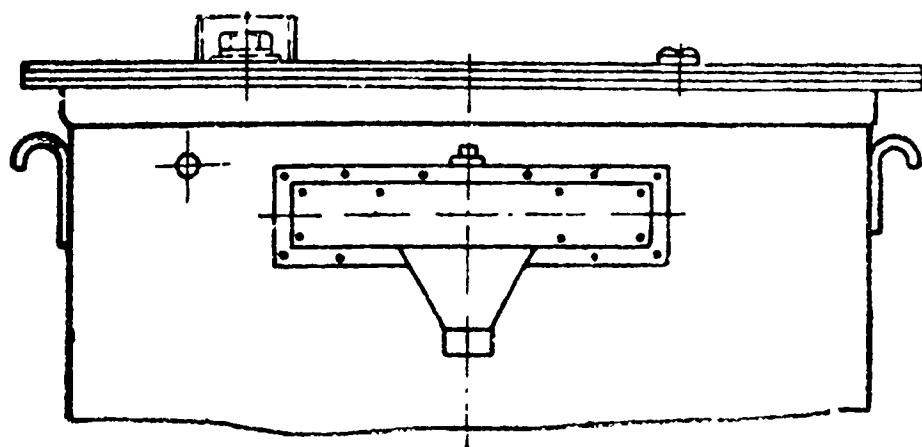


Рис. 128. Кабельное присоединение трансформатора.

жение или — при напряжениях до 500 V — подводят прямо к клеммовой доске из гетинакса или иного подобного материала.

ОБЩИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ТРАНСФОРМАТОРА

А. ТОК ХОЛОСТОГО ХОДА

§ 65. Ток холостого хода однофазного трансформатора

Активная слагающая I_{0a} тока холостого хода, покрывающая полные потери холостого хода $P_0 W$, определяется из равенства:

$$I_{0a} = \frac{P_0}{U_2} \text{ А} \quad (90)$$

в предположении, что обмотка (2) низшего напряжения является намагничивающей, как чаще всего и бывает при испытаниях нормальных трансформаторов. Реактивная слагающая, затрачиваемая на создание магнитного потока, равна:

$$I_{0p} = \frac{\Sigma l_{\mu} \cdot a\omega + \Sigma 0,8 \cdot B \cdot \delta}{K_2 \cdot \sqrt{2} \cdot w_2} \text{ А.} \quad (91)$$

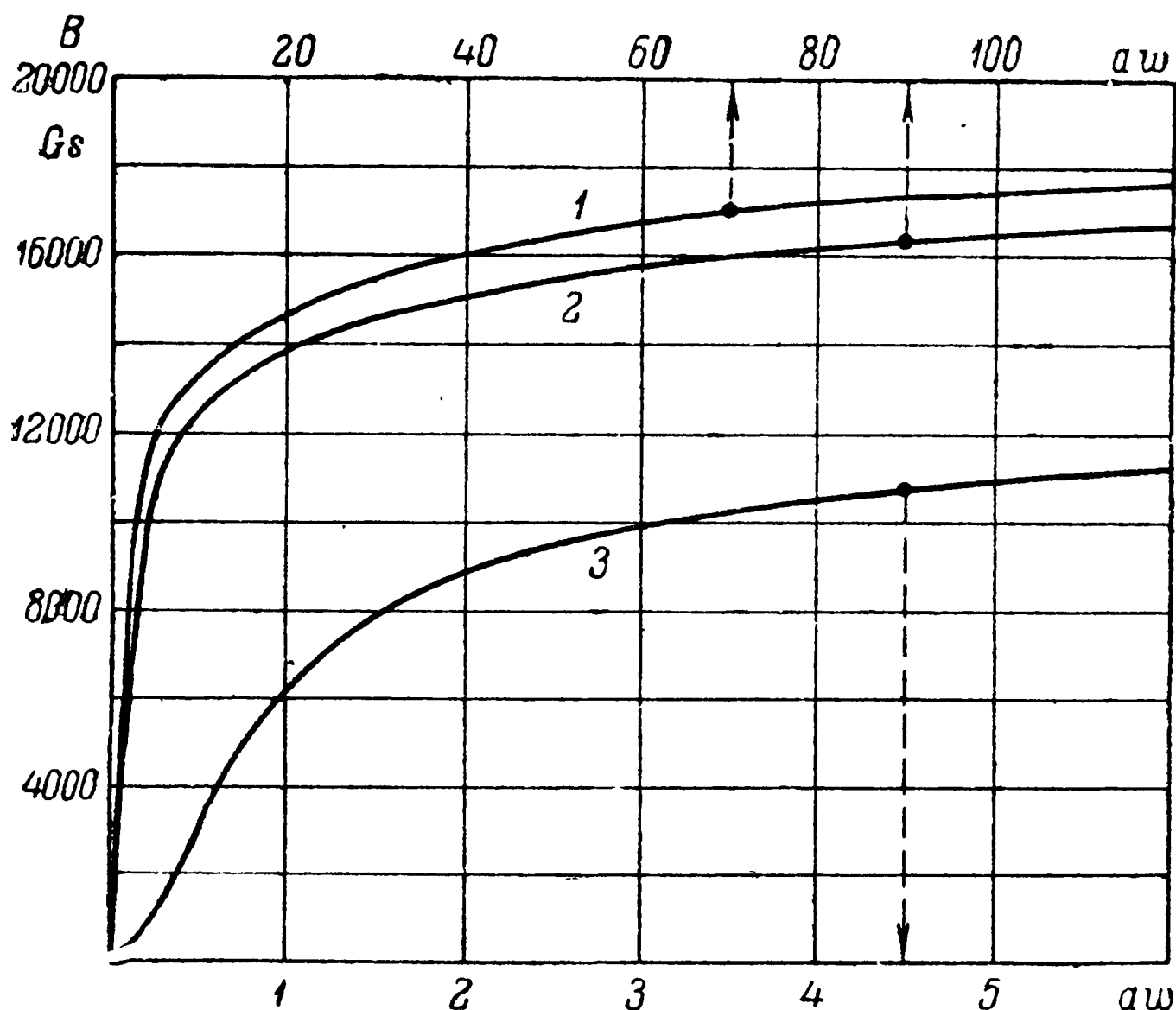


Рис. 129. Кривые намагничения для электротехнической стали разных марок: кривая 1—сталь марки EC1A; кривые 2 и 3—сталь марки EC4A.

В числителе первая сумма распространяется на части магнитной цепи, состоящие из магнитного материала (стержни, ярма) при длине l_{μ} см каждой части, а значения $a\omega$ — ампервитков на 1 см — для данной индукции определяются по кривым намагничения (рис. 129). Так как кривые сняты при постоянном токе, то для получения действующего значения переменного

тока в знаменатель введен множитель $\sqrt{2}$. Вторая сумма распространяется на все зазоры магнитной цепи, причем величина каждого зазора равна δ см, а индукция в нем зависит от того, где помещается данный зазор (в стержне или в ярме). Число зазоров определяется по эскизу сердечника с учетом способа сборки листов; для обычных однофазных трансформаторов оно равно 4. У больших трансформаторов оно может быть и больше при длине стержней или ярм большей, чем 2000 mm, так как

Таблица 34

B гауссы	α_{III}	α_V	K_2	
			однофазные трансформаторы	трехфазные трансформаторы (§ 66)
1	2	3	4	5
10000	0,04	0,02	1,05	1
11000	0,05	0,025	1,08	1
12000	0,07	0,035	1,11	1
13000	0,10	0,05	1,16	1
14000	0,22	0,11	1,29	1,03
15000	0,42	0,21	1,47	1,09

это есть предельный размер листов трансформаторной стали (§ 25).

Величину δ каждого зазора следует считать при сборке внахлестку 0,05 mm = 0,005 см на каждый зазор, что соответствует эквивалентному магнитному сопротивлению в стыке при такой сборке; при сборке же впритык — в зависимости от тол-

щины прокладок в стыках — по 0,3 ÷ 1,5 mm = 0,03 ÷ 0,15 см на каждый зазор. Прокладка делается из теплостойкого и прочного материала, например летеорида и асбестовой бумаги, или из нерастворимого в масле миканита.

В формуле (91) еще обозначают: w_2 — число витков намагничивающей обмотки, K_2 — коэффициент, учитывающий наличие гармоник в кривой намагничивающего тока; он зависит от величины индукции и сорта трансформаторной стали и может быть точно определен только из построения кривой намагничивающего тока и определения ее гармоник (главным образом третьей и пятой). При этом для однофазных трансформаторов:

$$K_2 = \frac{1 + \alpha_{III} + \alpha_V}{\sqrt{1 + \alpha_{III}^2 + \alpha_V^2}}, \quad (92)$$

где α_{III} и α_V представляют отношения амплитуд третьей и пятой гармоник к амплитуде первой гармоники кривой тока намагничивания. В табл. 34 [Л. 1, стр. 188] приведены примерные значения α_{III} , α_V и коэффициента K_2 для трансформаторной стали.

Зная активную и реактивную составляющие тока холостого хода, можно получить и полное его значение:

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2} \text{ А.} \quad (93)$$

Более полное представление о токе холостого хода дает его процентное значение по отношению к номинальному току:

$$i_0 = \frac{I_0}{I_2} 100\% . \quad (94)$$

Для стандартных трансформаторов эта величина колеблется в пределах $2 \div 10\%$; первая цифра относится к большим, вторая — к малым трансформаторам.

§ 66. Ток холостого хода трехфазного трансформатора

1. Стержневые трансформаторы. Как известно [Л. 1, гл. 8; Л. 146—149], процесс холостого хода обычного трехфазного трансформатора характеризуется целым рядом усложнений: влияет, например, схема соединения не только первичной, но и вторичной обмотки; форма кривой тока в разных фазах получается различной и т. д. Поэтому обычные расчеты приходится упрощать. У обычного трехфазного стержневого трансформатора стержни трех фаз соединены в точках M_1 и M_2 в звезду (рис. 130).

Поэтому длину магнитной цепи l_μ можно считать равной для средней фазы:

$$l_\mu = l + 2 \cdot \frac{b_\pi}{2} = l + b_\pi , \quad (95)$$

а для крайних:

$$\begin{aligned} l'_\mu &= 2 \left(\frac{l_\pi}{2} - \frac{b}{2} \right) + l + 2 \frac{b_\pi}{2} = \\ &= l_\pi - b + l + b_\pi . \end{aligned} \quad (96)$$

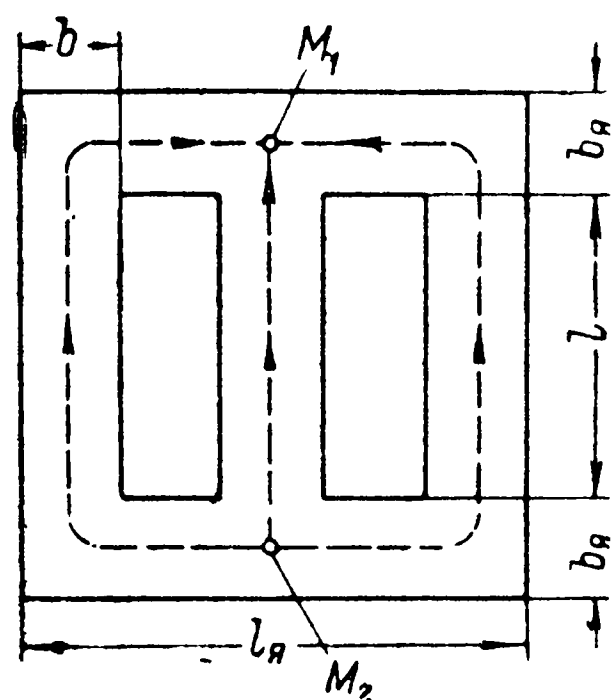


Рис. 130. Магнитные потоки трех фаз обычного стержневого трансформатора.

При сборке такого сердечника внахлестку в магнитную цепь средней фазы попадает лишь один зазор, а в цепь крайних фаз — три зазора; при сборке впритык будет по два зазора для каждой фазы (о больших трансформаторах см. § 65, там же см. о величине зазоров). Расчет намагничивающего тока ведется в отдельности для средней и для крайних фаз, аналогично изложенному в § 65 для однофазного трансформатора. Поправочный коэффициент K'_2 для трехфазного трансформатора, равный:

$$K'_2 = \sqrt{\frac{1 + \alpha_V^2}{1 + \alpha_{III}^2 + \alpha_V^2}} , \quad (97)$$

берется из столбца 5 (табл. 34) в зависимости от индукции B .

При холостом ходе трехфазного трансформатора мощности, поглощаемые из сети разными фазами, как известно [см., например, Л. 1, стр. 194], не равны между собой; поэтому активную

составляющую тока холостого хода считают по среднему для всех фаз значению:

$$I_{0a} = \frac{P_0}{U_2 \cdot \sqrt{3}} \text{ А.} \quad (98)$$

По активной составляющей и среднему для трех фаз значению реактивной составляющей вычисляют полное значение тока

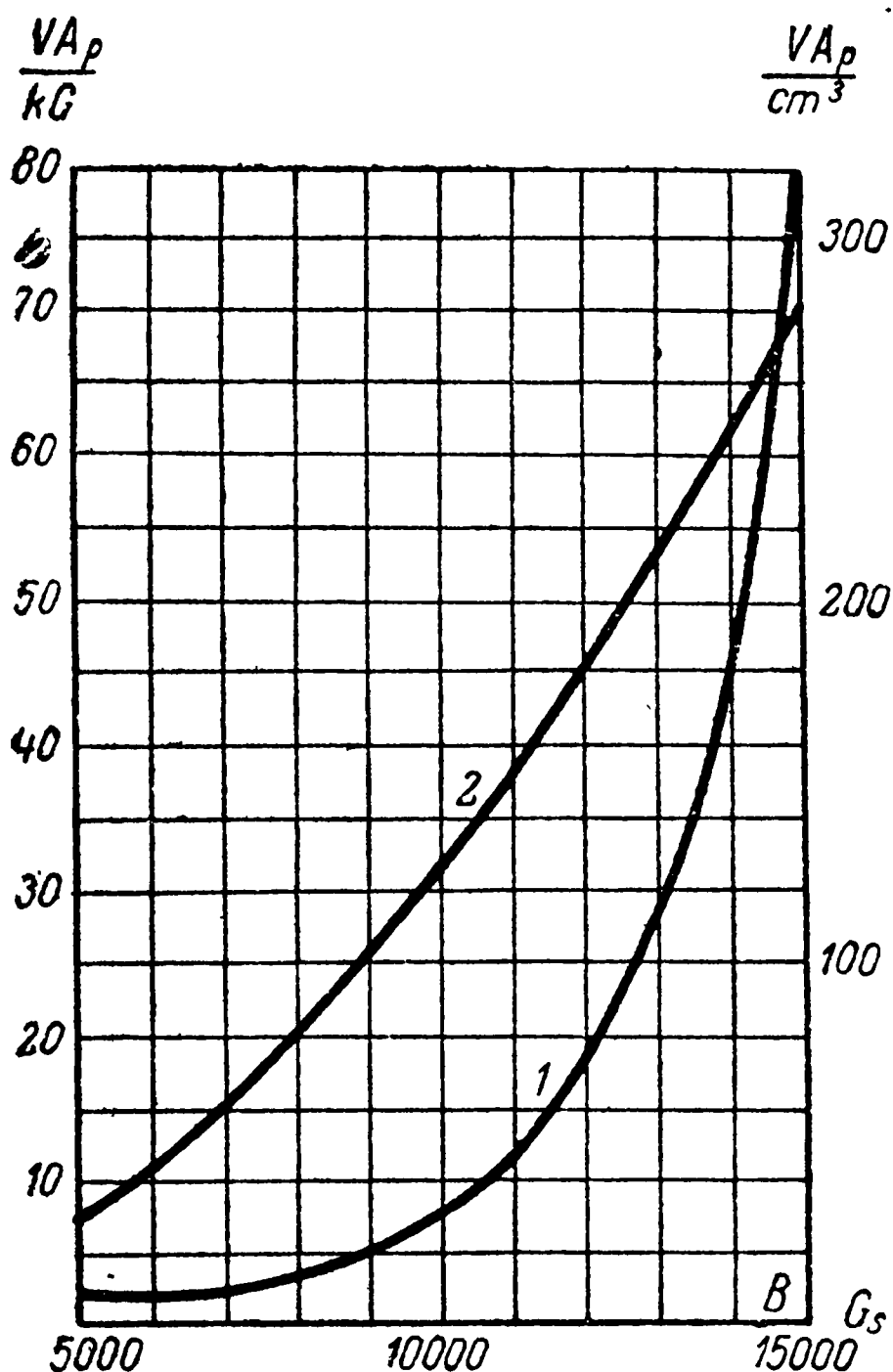


Рис. 131. Кривая 1—намагничивающие вольтамперы на 1 kG для германской трансформаторной стали; кривая 2—вольтамперы на 1 cm³ зазоров (стыков).

холостого хода, а затем и процентное значение этого тока по отношению к номинальному току трансформатора.

2. Броневые трансформаторы. Расчет средних значений I_{0a} и I_{0p} ведется так же, как для стержневых трансформаторов. Не надо забывать, что броневые трехфазные трансформаторы нельзя соединять в Y/Y и что обе обмотки средней фазы должны быть включены в обратном направлении (см. § 36, а также Л. 1, стр. 210).

§ 67. Определение намагничивающих киловольтампер

Этот метод расчета очень прост и весьма пригоден для ориентировочных и проверочных расчетов. Ниже приведено обоснование этого метода в применении к однофазному трансформатору с одинаковым сечением S по всей длине l_c магнитной цепи.

По закону э.д.с. $E = 4,44 \cdot \omega \cdot f \cdot B \cdot S \cdot 10^{-8} \text{ В,} \quad (48)$

по закону м.д.с. $I_{0p} \cdot \omega \cdot \sqrt{2} \cdot K_2 = l_c \cdot a \omega. \quad (99)$

Здесь I_{0p} — намагничивающая составляющая тока холостого хода, K_2 — см. § 65. Из перемножения между собой равенств (48) и (99) получается:

$$E \cdot I_{0p} = VA_p = \frac{4,44 \cdot \omega \cdot f \cdot B \cdot S \cdot l_c \cdot a \omega \cdot 10^{-8}}{\omega \cdot \sqrt{2} \cdot K_2}. \quad (100)$$

Произведение $S \cdot l_c = \frac{G_c}{\gamma_c} \cdot 10^3$, где G_c — вес сердечника в килограммах.

Тогда при $f = 50 \text{ Hz}$ для сердечника будет:

$$|VA_p|_c = \frac{B \cdot a\omega \cdot 2,22 \cdot 10^{-6}}{\gamma_c \cdot \sqrt{2} \cdot K_2} \cdot G_c = \left(\frac{VA_p}{\text{kG}} \right)_c \cdot G_c \quad VA, \quad (101)$$

где

$$\left(\frac{VA_p}{\text{kG}} \right)_c = f(B)$$

есть значение намагничивающих вольтампер на 1 kG веса сердечника.

Для зазоров $a\omega = 0,8 B$; вольтамперы на 1 cm^3 объема зазоров можно вычислить из уравнения (100), полагая $K_2 = 1$, $S = 1$, $l_c = \delta = 1$:

$$\left| \frac{VA_p}{\text{cm}^3} \right|_\delta = \frac{2,22 \cdot 0,8 \cdot B^2 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{2}} = 1,25 \cdot B^2 \cdot 10^{-6}. \quad (102)$$

На рис. 131 приведены: кривая 1

$$\left(\frac{VA_p}{\text{kG}} \right)_c = f(B)$$

для германской трансформаторной стали [Л. 1, стр. 193] и парабола 2

$$\left| \frac{VA_p}{\text{cm}^3} \right|_\delta = 1,25 \cdot B^2 \cdot 10^{-6}.$$

Поскольку магнитная цепь трансформатора в разных своих частях может иметь разные сечения и разные индукции, а также содержит зазоры общего объема $V_\delta \text{ cm}^3$, то общие намагничивающие вольтамперы для всего трансформатора будут равны:

$$VA_p = G_c \left(\frac{VA_p}{\text{kG}} \right)_c + G_\pi \left(\frac{VA_p}{\text{kG}} \right)_\pi + V_\delta \left(\frac{VA_p}{\text{cm}^3} \right)_\delta. \quad (103)$$

Первая сумма — для стержней, вторая — для ярем, третья — для зазоров. Отсюда можно найти и реактивную слагающую тока холостого хода:

$$I_{0p} = \frac{VA_p}{U_2} \text{ А.} \quad (104)$$

Этот метод расчета применим как для однофазного трансформатора, так и для каждой фазы трехфазного и для работы как с первичной, так и с вторичной стороны.

В. ПОТЕРИ И К.П.Д. ТРАНСФОРМАТОРА

§ 68. Основные потери в сердечнике

Основные потери P_c в активной стали сердечника состоят, как известно, из потерь на гистерезис и на токи Фуко. Как те, так и другие имеют место одновременно, в каждом килограмме активного материала сердечника; их нет смысла определять в отдельности при расчете трансформаторов. Нужно только

помнить, что потери на гистерезис для высоколегированной (§ 25) стали в $8 \div 9$ раз больше потерь на токи Фуко.¹

Основные потери можно выразить так:

$$P_c = \sum (v \cdot G'_c), \quad (105)$$

где v — потери в ваттах на 1 kG стали, зависящие от ее сорта (марки), от толщины листов, частоты и магнитной индукции (§ 25), G'_c — вес в килограммах для каждой из тех частей сердечника, на которые его условно разделяют для подсчета потерь. Суммирование распространено на весь сердечник.

Как известно, потери в стали при намагничении переменным током являются результатом довольно сложных процессов, происходящих в ней при этом. Кроме того, эти процессы развиваются различно в стали разных марок. Вот почему подобно кривой намагничения кривая потерь в стали принципиально не может быть представлена точно (а иногда даже и приближенно) в аналитической форме. Поэтому при всяких расчетах — в особенности при больших диапазонах частот и значений магнитной индукции — следует с большой осторожностью пользоваться всякого рода упрощенными формулами, приводимыми даже в самых авторитетных руководствах и пособиях. Общей и понятной тенденцией всех авторов является стремление упростить выражение для потерь P_c . Таким именно образом появилась известная формула для полных потерь в стали на гистерезис и на токи Фуко:

$$P_c = v_{10} \cdot \left(\frac{B}{10^4} \right)^2 \cdot G_c, \quad (106)$$

где v_{10} — удельные потери в стали при определенной толщине листов, частоте 50 Hz, синусоидальной форме кривой приложенного напряжения и индукции $B = 10\,000$ Gs.

Формула (106), аналогичная по своей структуре формуле для джоулевых потерь в меди:

$$P_m = 2,4 \cdot \Delta^2 \cdot G_m$$

(§ 71), неудачна уже тем, что по виду подобна этой последней формуле.

В действительности нет никакой аналогии в процессах, производящих потери в меди и потери в стали.² Показатель степени при $\frac{B}{10^4}$ в формуле (106) лишь приближенно, и притом для некоторых определенных пределов значения индукции B , близок к 2, тогда как показатель степени у Δ в формуле для P_m всегда равен 2.

¹ Для обычной динамной стали, толщиной 0,5 mm, это соотношение спускается до $1,5 \div 2$.

² Имеются в виду потери на гистерезис в стали.

Удельные потери P_c с учетом влияния частоты, пожалуй, могут быть выражены формулой:

$$P_c = v' \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot \left(\frac{B}{10^4}\right)^\alpha \cdot G_c, \quad (107)$$

где $v' = v_{10}$ для частоты 50 Hz; однако показатели степени α и β не являются величинами постоянными, но некоторыми функциями своих оснований, а именно:

$$\alpha = F_1(B), \quad \beta = F_2(f).$$

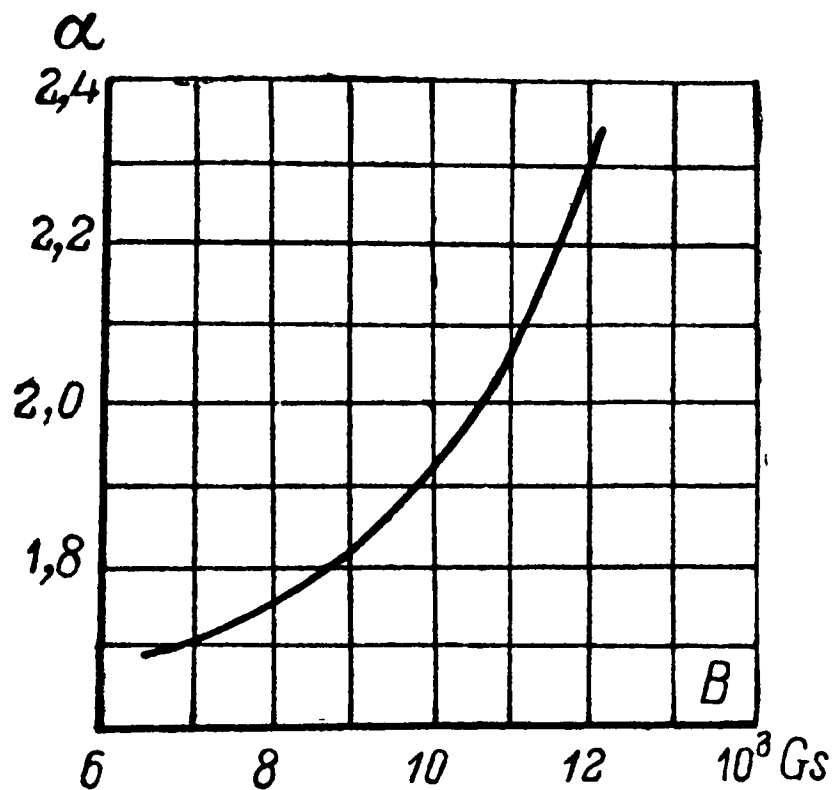


Рис. 132. Значение показателя степени α в формуле (107) для английской слаболегированной стали.

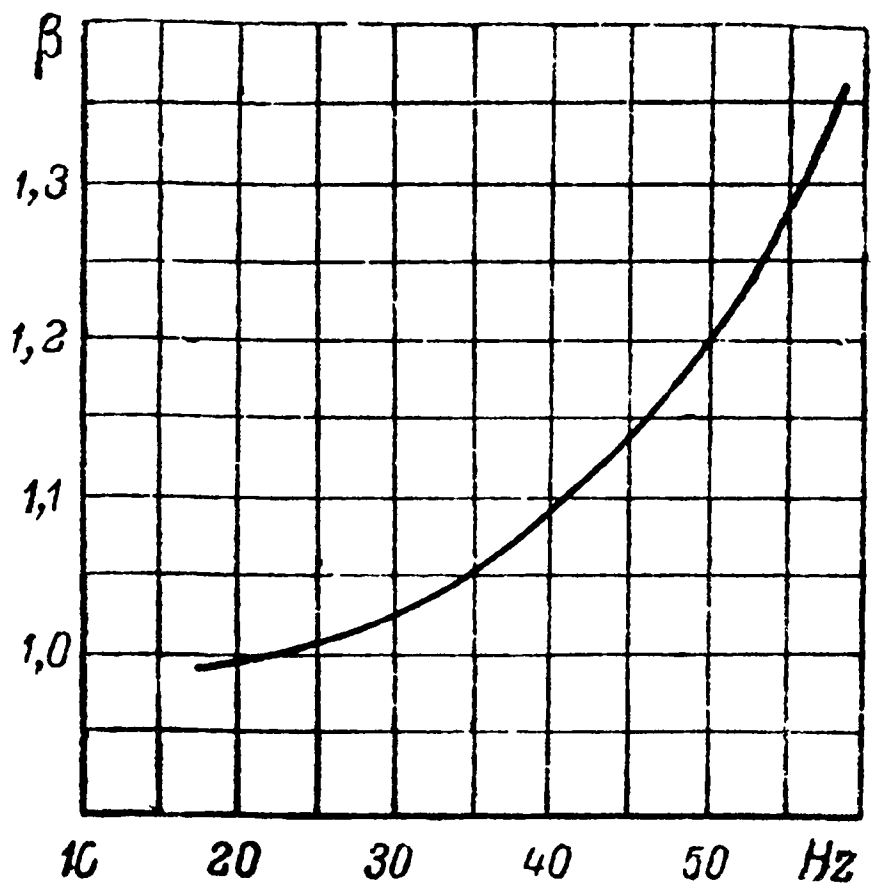


Рис. 133. Значение показателя степени β в формуле (107) для английской слаболегированной стали.

Например, для одного образца трансформаторной стали было найдено [Л. 151, стр. 26]:

$$\text{при } B = 7000 \text{ Gs} \quad \alpha = 1,84; \quad \text{при } B = 15\,000 \text{ Gs} \quad \alpha = 2,52.$$

Значение β для образца американской высоколегированной трансформаторной стали изменялось от 1,18 до 1,33; см. также [Л. 150]. На рис. 132 и 133 даны кривые изменения показателей степени α и β [Л. 7, стр. 35 и 37] для образца английской слаболегированной стали.

Таким образом, при небольших значениях магнитной индукции B , потери в стали возрастают медленнее, чем по закону квадрата индукции, а при тех значениях индукции, которые применяются в трансформаторах, потери возрастают быстрее, чем по закону квадрата индукции; при очень же больших значениях B , лежащих за пределами обычного при-

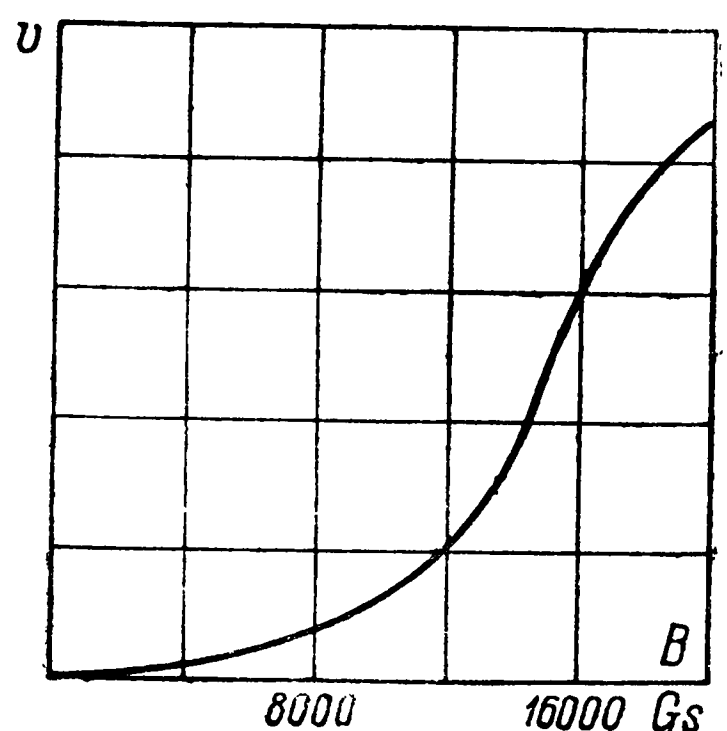


Рис 134. Примерный вид кривой $v = f(B)$ для больших индукций (по английским данным).

менения, примерно при $B > 16\,000$ Gs, кривые $\nu = F(B)$ имеют, повидимому, точку перегиба, проходя примерно так, как указано схематически на рис. 134 (по английским данным).

Как видно, действительные кривые потерь в стали гораздо сложнее той условной параболы (формула 106), которую так часто считают подлинной кривой потерь.

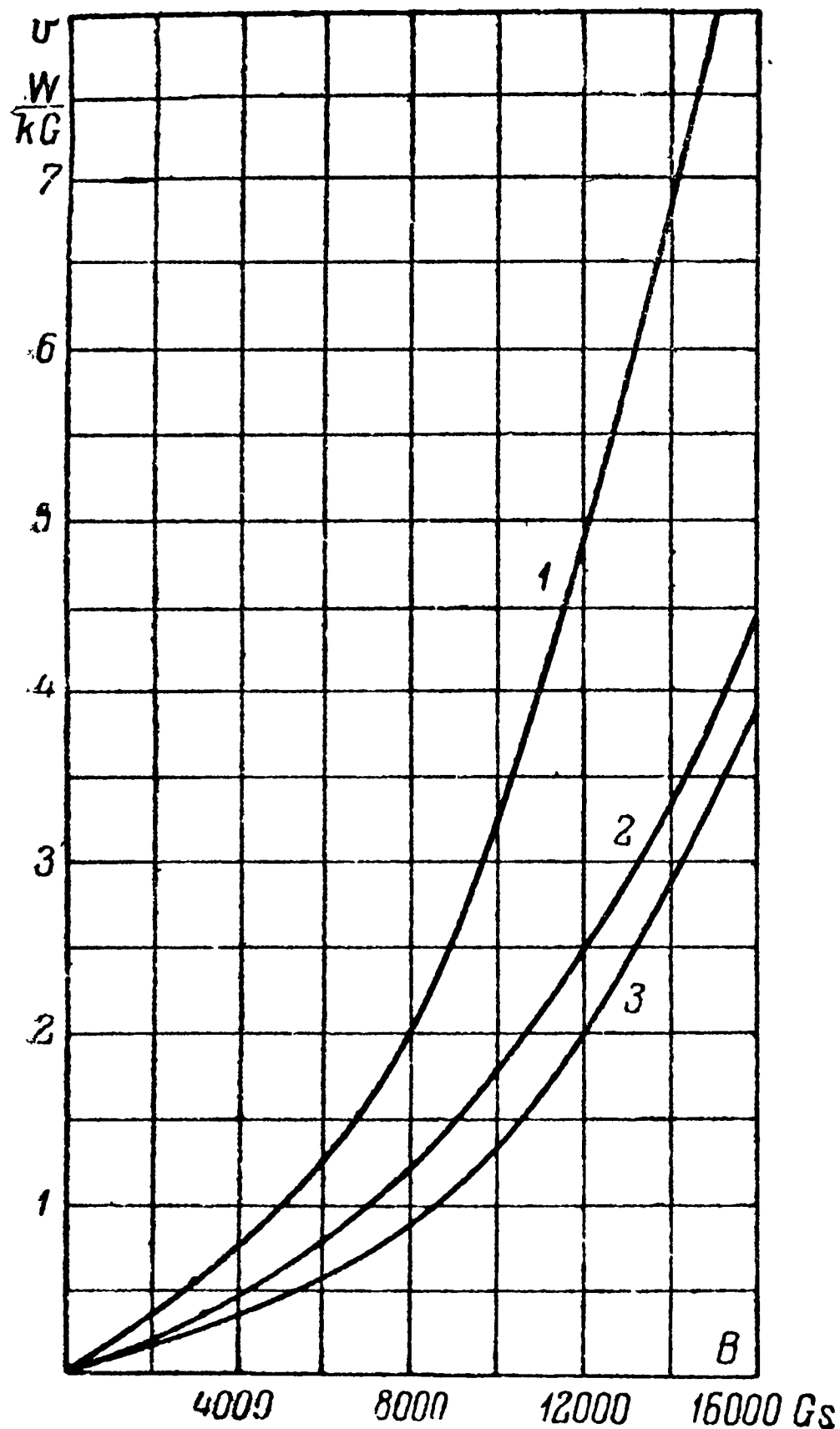


Рис. 135. Кривые потерь для электротехнической стали разных марок: кривая 1 — сталь марки EC1A, толщиной 0,5 mm; кривая 2 — сталь марки EC4A, толщиной 0,5 mm; кривая 3 — сталь марки EC4A, толщиной 0,35 mm.

потока, поскольку последний является интегральной функцией по отношению к э. д. с. Таким образом, при острой форме кривой приложенного напряжения, т. е. при $k_f > 1,11$ (§ 37), форма кривой магнитного потока будет плоской, и действительное максимальное значение индукции B снизится, а вместе с ним, согласно соотношению (107), снизятся и общие потери

В этом отношении очень осторожно поступает ОСТ 6391, нормируя лишь две точки кривой потерь указанием значений ν_{10} и ν_{15} (§ 25).

Вот почему автор, отсылая желающих более детально ознакомиться с этим вопросом к литературе (см., например, [Л. 1, 2, 6, 7, 12, 150 и 151]), не рекомендует вовсе пользоваться для расчетов формулой (106) или иными подобными, но лишь кривыми или таблицами потерь, определенных для той марки стали, для которой ведется расчет, или для близкой ей по свойствам. Такие кривые приведены на рис. 135. Для расчета потерь при повышенных частотах (до 1000 Hz) можно пользоваться табл. 35 (ватты на 1 kG для высоколегированной трансформаторной стали, толщиной 0,35 mm).

Все изложенное в настоящем параграфе касалось потерь в стали при синусоидальной форме кривой приложенного напряжения, а значит — при такой же форме кривой магнитного

в отношении:

$$(1,11/k_f)^{\alpha}.$$

Очевидно, потери увеличатся при плоской форме кривой приложенного напряжения ($k_f < 1,11$), так как кривая магнитного

Таблица 35

f (герц)	30	60	300	500	1000
$B = 5000$ Gs	0,192	0,46	4,06	8,30	24,4
$B = 10000$ "	0,63	1,47	14,6	31,1	96,0
$B = 15000$ "	1,63	4,21	38,8	88	263

потока и индукции B будет заостренной (повышение B). Кривые рис. 136, дают изменение потерь в слаболегированной английской стали при изменении коэффициента k_f [Л. 7, стр. 43].

Если же форма кривой магнитного потока будет отличаться

от синусоиды, но максимальные значения магнитного потока и магнитной индукции не изменятся, то не изменятся и потери на гистерезис, ибо для целого числа циклов перемагничивания эти потери зависят только от пределов, между которыми изменяется индукция B , но не от закона, по которому она изменяется. Таким образом, для всех трех кривых изменения магнитной индукции (рис. 137а) потери на гистерезис в стали будут одинаковыми. Однако это касается лишь кривых, имеющих один максимум за полупериод.

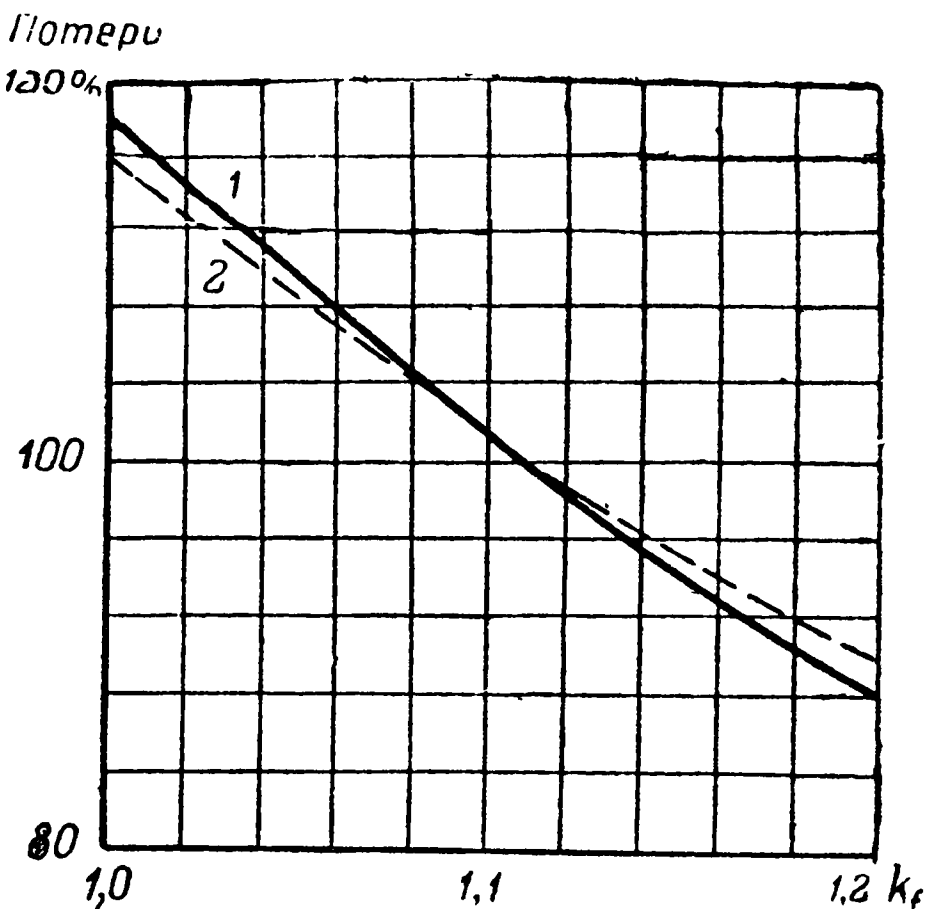


Рис. 136. Изменение потерь в стали в зависимости от k_f (для слаболегированной английской стали): кривая 1 — потери на гистерезис; кривая 2 — общие потери.

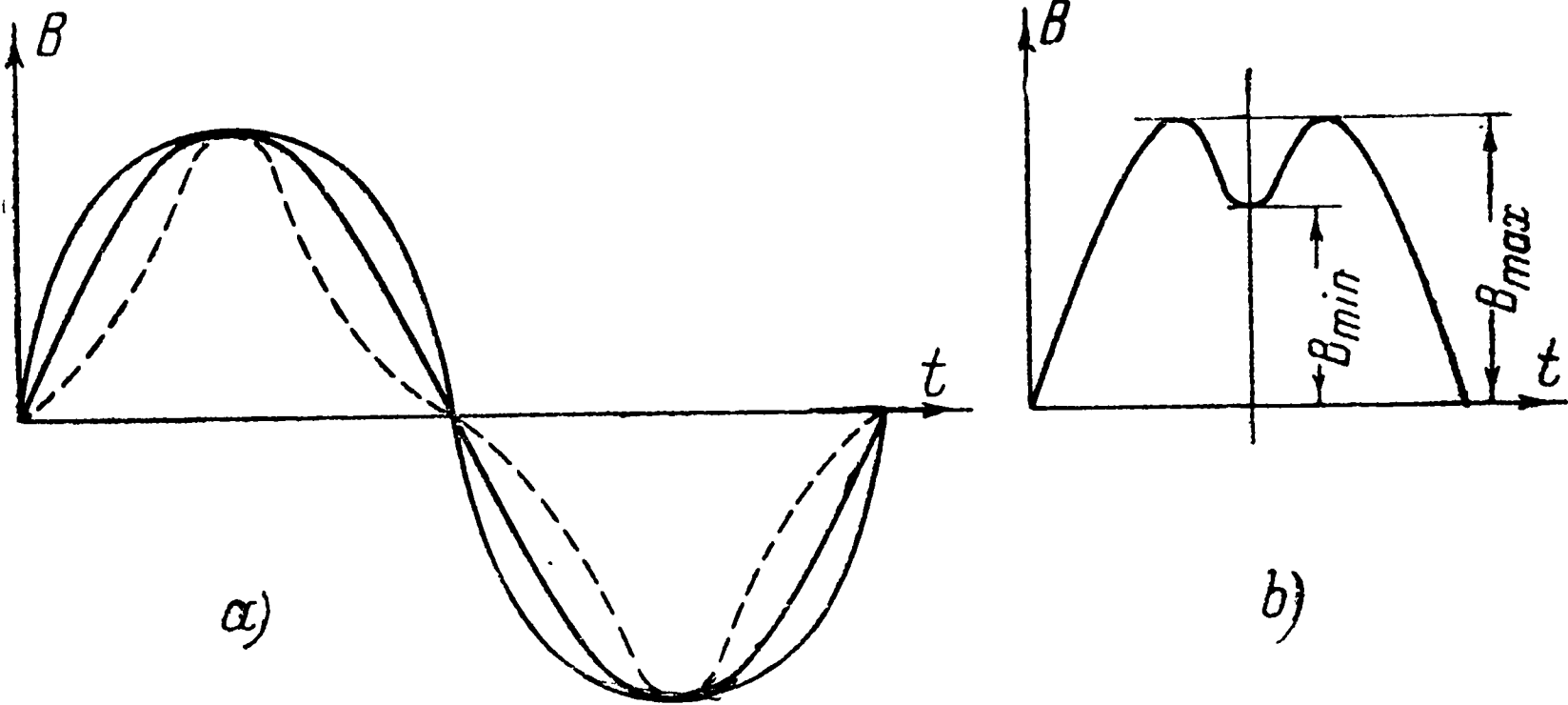


Рис. 137. Кривые магнитной индукции: а — с одним максимумом; б — с двумя максимумами за полупериод.

Для кривых же, подобных изображенной на рис. 137*b*, потери на гистерезис (а значит для высоколегированной стали почти все потери) могут быть приближенно определены по формуле [Л. 1, стр. 177]:

$$v = v' \cdot \frac{f}{100} \cdot \left[2 \left(\frac{B_{\max}}{10^4} \right)^2 - \left(\frac{B_{\min}}{10^4} \right)^2 \right] \text{ W/kg.} \quad (108)$$

§ 69. Добавочные потери при холостом ходе

Кроме основных потерь P_c при холостом ходе трансформатора (§ 68) имеется еще ряд потерь добавочных; взятые в отдельности они не велики, но в совокупности могут составить ощутительную добавку к основным потерям холостого хода, определяемым на основе лабораторных исследований стали на аппарате Эпштейна и др.

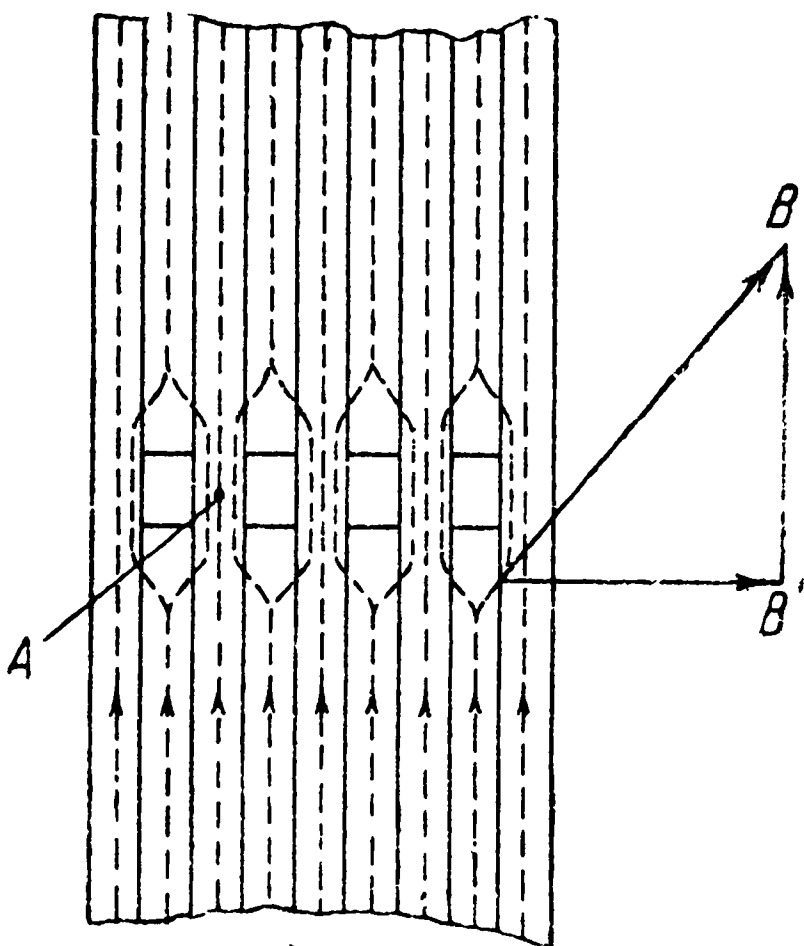


Рис. 138. Путь магнитных линий в стыках при сборке внахлестку.

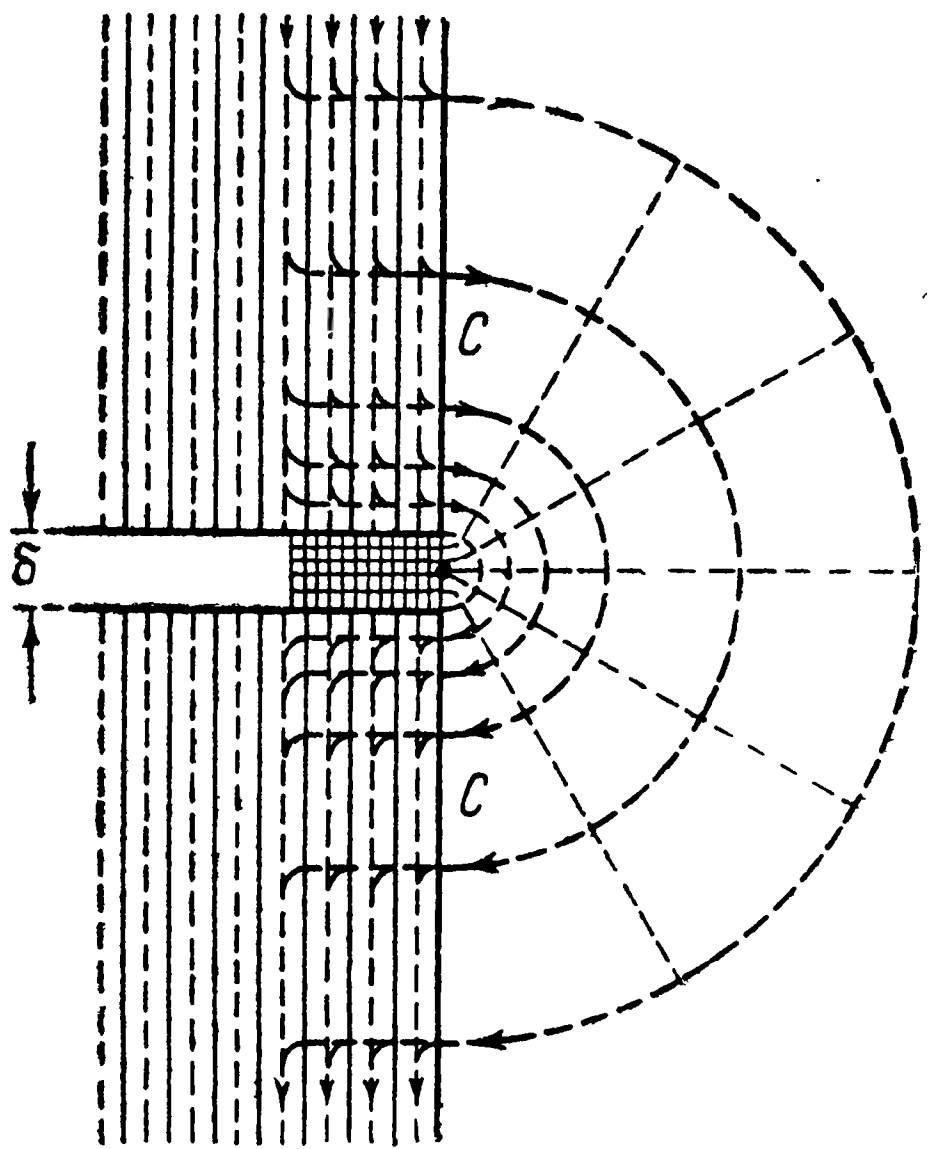


Рис. 139. Путь магнитных линий в стыках при сборке впритык.

Некоторые из добавочных потерь имеют место в самом сердечнике, другие же вне его; из первых можно назвать следующие:

1) добавочные потери, связанные с изменением структуры листов при механической обработке последних — резка, штамповка отверстий, снятие заусенцев и т. д. (§ 4);

2) потери в стыках как при сборке внахлестку (рис. 138) от сжатия магнитного потока в местах A и появления слагающей B' , перпендикулярной листам, так и при сборке впритык (рис. 139) от рассеяния в стороны главного магнитного потока и потерь в местах C ;

3) сжатие магнитного потока в углах, образуемых стержнями

и ярмами (рис. 140); в самом углу в точке D магнитная индукция теоретически равна ∞ ;

4) в стержневых трехфазных трансформаторах в месте соединения среднего стержня с ярмом возникает эллиптическое магнитное поле [Л. 152, 153], производящее добавочные потери;

5) в местах расположения отверстий для стяжных шпилек активное сечение стержней или ярма уменьшается, индукция увеличивается, потери растут;

6) в самих стяжных шпильках возникают потери, правда небольшие [Л. 154], но все же иногда заставляющие даже заботиться об охлаждении шпилек большого диаметра ($30 \div 40$ mm) у мощных трансформаторов, собираемых впритык; около шпилек делают тогда охлаждающие каналы.

Другие потери имеют место вне сердечника; из них можно назвать следующие:

7) потери в баке у трехфазных трансформаторов с соединением обмоток Y/Y от потоков, замыкающихся от ярма к ярму через бак [Л. 1, стр. 291];

8) потери в изоляции от диэлектрического гистерезиса у весьма высоковольтных, главным образом, испытательных трансформаторов;

9) потери джоулевы от тока холостого хода, равные $m \cdot r_2 \cdot I_{0\phi}^2$, где m — число фаз.

Вышеназванные добавочные потери, в сумме равные $P_{0\partial}$, складываясь с потерями P_c , дают увеличение общих потерь холостого хода на $10 \div 25\%$ по сравнению с рассчитанными по § 68. Это учитывается уже при предварительном расчете трансформатора (§ 109) введением коэффициента k_0 , причем:

$$P_0 = P_c + P_{0\partial} = k_0 \cdot P_c. \quad (109)$$

§ 70. Кривые холостого хода

1. Задаваясь различными значениями напряжения U_2 и находя пропорциональные значения магнитной индукции:

$$B = B_n \cdot \frac{U_2}{U_{n2}},$$

где B_n — значение индукции при номинальном напряжении U_{n2} , определяют по § 68 и 69 потери в сердечнике при разных приложенных напряжениях. Результаты удобно расположить в виде таблицы, подобной табл. 49. Для напряжения U_2 удобно взять 4—5 таких значений, которые бы упростили графические построения; например при $U_{n2} = 6300$ V, удобно взять еще напряжения 3000, 4000, 5000, 7500 V. По вычисленным значениям

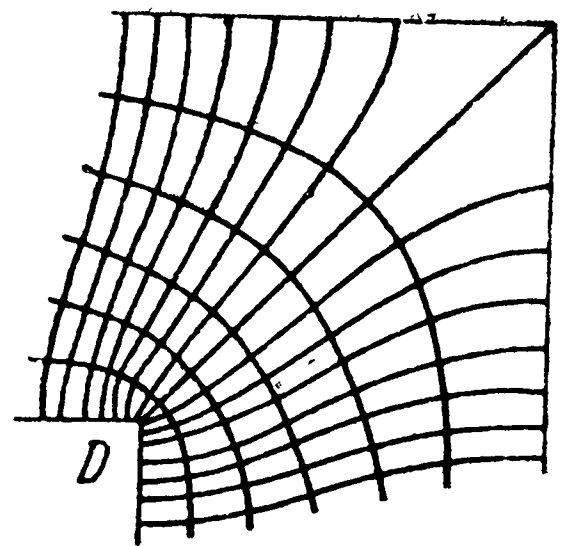


Рис. 140. Сжатие магнитных линий в углах магнитной цепи.

общих потерь P_0 строят кривую потерь холостого хода $P_0 = f_1(U_2)$.

2. Определяя по данным § 65—67 величину тока холостого хода для тех же значений индукции, помещают данные в ту же таблицу и строят кривую тока холостого хода $I_0 = f_2(U_2)$.

§ 71. Джоулевы потери в обмотках

Потери Джоуля $P_{м1}, P_{м2} \dots$ и т. д. на нагрев каждой из обмоток трансформатора равны соответственно:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для обмотки (1)} \quad P_{м1} = m \cdot r_{1\vartheta} \cdot I_{1\varphi}^2 \quad \text{W} \\ \text{для обмотки (2)} \quad P_{м2} = m \cdot r_{2\vartheta} \cdot I_{2\varphi}^2 \quad \text{W} \end{array} \right\} \quad (110)$$

и т. д.

Через $r_{1\vartheta}, r_{2\vartheta} \dots$ и т. д. здесь обозначены сопротивления обмоток на 1 фазу, отнесенные к температуре $\vartheta^\circ\text{C}$ (обычно 75°C) и измеренные постоянным током.

Обычно расчет потерь ведут не по формулам (110), но по иным, получающимся из первых следующим путем (для обмотки 1):

$$r_{1\vartheta} = (r_1)_{20} \cdot [1 + \alpha_m (\vartheta - 20)] = \frac{l_{м1} \cdot \rho_{м20}}{S_{м1}} [1 + \alpha_m \cdot (75 - 20)], \quad (111)$$

где $l_{м1}$ — длина в метрах обмотки (1) на фазу, $S_{м1}$ — сечение в кв. миллиметрах обмотки (1), α_m — температурный коэффициент; для меди $\alpha_m = 0,00393$.

Поскольку $l_1 = S_{м1} \cdot \Delta_1$, из формул (110) и (111) получаем:

$$\begin{aligned} P_{м1} &= \frac{m \cdot l_{м1} \cdot \rho_{м20} (1 + 0,216)}{S_{м1}} \cdot S_{м1}^2 \cdot \Delta_1^2 = \\ &= m \cdot l_{м1} \cdot S_{м1} \cdot \rho_{м20} \cdot 1,216 \cdot \Delta_1^2 \quad \text{W}. \end{aligned} \quad (112)$$

Из выражения для веса меди $G_{м1} = m \cdot l_{м1} \cdot S_{м1} \cdot \gamma_m \cdot 10^{-3}$ кГ, где $\gamma_m = 8,9$ есть удельный вес меди, имеем:

$$m \cdot l_{м1} \cdot S_{м1} = \frac{G_{м1} \cdot 10^{-3}}{8,9}.$$

Подставляя последнее выражение в равенство (112), имеем окончательно:

$$P_{м1} = \frac{G_{м1} \cdot 10^{-3}}{8,9} \cdot \rho_{м20} \cdot 1,216 \cdot \Delta_1^2 = 2,4 \cdot \Delta_1^2 \cdot G_{м1} \quad \text{W}, \quad (113)$$

где для $\rho_{м20}$ взято значение $0,0175 \frac{\Omega}{\text{м/мм}^2}$; формула (113) является основной для подсчета джоулевых потерь.

Для алюминия она получает, конечно, иной коэффициент. Так как $\rho_{a20} = 0,031 \frac{\Omega}{\text{м/мм}^2}$, $\alpha_a = 0,0037$, $\gamma_a = 2,73$, то для $\vartheta = 75^\circ\text{C}$:

$$P_{a1} = 13,8 \cdot \Delta_1^2 \cdot G_{a1}. \quad (114)$$

При подсчете потерь для низковольтных обмоток не следует забывать потери в отводах.

§ 72. Добавочные потери в обмотках при нагрузке

Кроме джоулевых потерь P_m в обмотках и отводах (§ 71), в толстых проводах обмотки возникают еще добавочные потери $P_{мд}$ от пронизывания ее потоками рассеяния, создаваемыми самой обмоткой. Более легкому учету поддаются потери от продольных потоков рассеяния, составляющие, впрочем, главнейшую часть добавочных потерь в обмотке. Что касается потерь от тангенциальной и поперечной слагающих потока рассеяния, а также потерь в параллельных ветвях обмотки и т. д. — детально см., например, [Л. 1, стр. 293] — то, хотя некоторые из них можно подсчитать довольно точно, однако при надлежащей конструкции обмотки они вообще невелики и ими можно пренебречь.

Потери $P_{мд}$ учитываются обычно введением в расчет так называемого коэффициента Фильда (Field) или коэффициента полных потерь $K_F > 1$, причем:

$$P_m \cdot K_F = P_m + P_{мд} \quad (115)$$

или

$$K_F = 1 + \frac{P_{мд}}{P_m}.$$

Коэффициент K_F зависит от типа (конструкции) и размеров витка обмотки.

Пусть рис. 141а и 141б представляют разрезы обмоток плоскостью, проходящей через ось катушек; в первом случае — для концентрических обмоток, во втором — для чередующихся. Поскольку продольные потоки рассеяния Φ_s в основном определяют величину добавочных потерь, весьма важную роль играет расположение витков относительно направления потоков рассеяния. Например, на рис. 141а витки обмотки (2) расположены длинной стороной β своего сечения вдоль потоков рассеяния, а короткой α — поперек; на рис. 141б — наоборот. Обозначим через n_1 число витков обмотки, помещающихся вдоль потоков рассеяния, а через n_a — число витков в поперечном направлении. Например:

	На рис. 141а	На рис. 141б
Для обмотки (1) . . .	$n_1 = 14, \quad n_a = 4$	$n_1 = 10, \quad n_a = 2$
„ „ (2) . . .	$n_1 = 7, \quad n_a = 2$	$n_1 = 12, \quad n_a = 1$

Для концентрических обмоток (рис. 141а) при прямоугольном сечении витка коэффициент Фильда равен [Л. 20, стр. 75]:

$$K_{F\Box} = 1 + \frac{n_a^2 - 0,2}{9} (\alpha')^4, \quad (116)$$

а при круглом с диаметром $\alpha_{\bigcirc}$:

$$K_{F\bigcirc} = 1 + \frac{n_a^2 - 0,2}{15,25} (\alpha'_{\bigcirc})^4. \quad (117)$$

Здесь α' и α'_0 — „приведенные“ размеры, причем:

$$\alpha' = 2\alpha \cdot \sqrt{\frac{f \cdot \beta \cdot n_1}{l_s \cdot \rho_\theta \cdot 10^4}} \text{ см,} \quad (118)$$

$$\alpha'_0 = 2\alpha_0 \cdot \sqrt{\frac{f \cdot \alpha_0 \cdot n_1}{l_s \cdot \rho_\theta \cdot 10^4}} \text{ см,} \quad (119)$$

где все величины известны из предыдущего; величину $\rho_\theta \cdot 10^4$ берут равной $0,0175 \cdot 1,216 = 213$ для медной обмотки при $\theta_m = +75^\circ\text{C}$, а все размеры считают в сантиметрах.

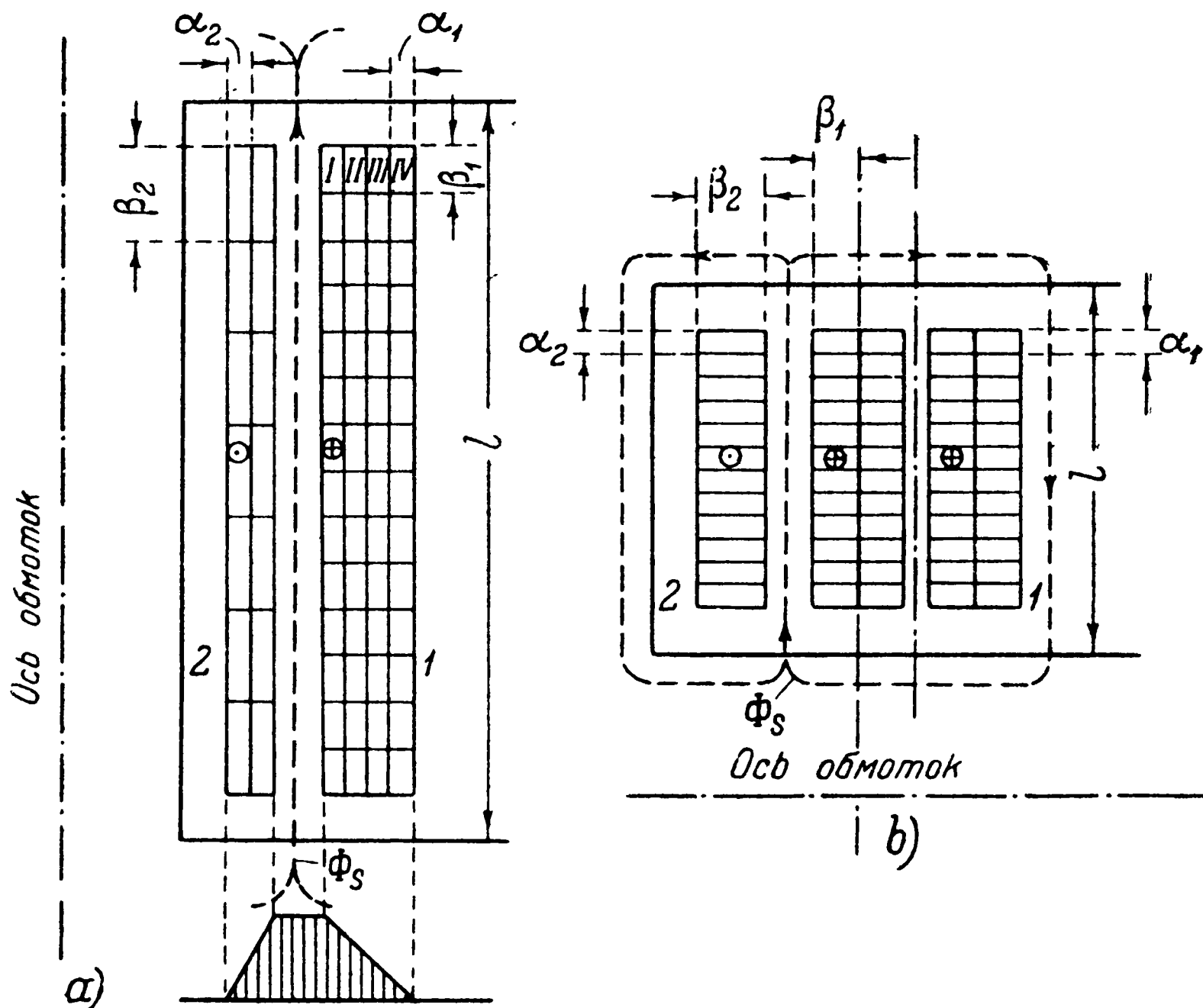


Рис. 141. Разрезы обмоток: *a* — концентрических, *b* — чередующихся.

Для чередующихся обмоток (рис. 141*b*) коэффициент Фильда можно определять по формулам (116) и (117) с той лишь разницей, что число витков n_a должно относиться к полугруппе каждой обмотки согласно картине полей рассеяния, а размеры α и β поменяются местами.

Из выражения для коэффициента Фильда видно, что относительные добавочные потери в обмотке пропорциональны второму слагаемому, стоящему после 1. Они пропорциональны четвертой степени того размера витка, который (размер) расположен перпендикулярно потокам рассеяния Φ_s , и зависят, кроме того, от квадрата числа витков, располагающихся в сечении обмотки в том же направлении, т. е. перпендикулярно потокам рассеяния.

При этом чрезвычайно важно отметить, что в каждой обмотке витки предполагаются соединенными последовательно. Если же виток состоит из нескольких параллельных проводов, например, если бы на рис. 141а провода *I*, *II*, *III* и *IV* представляли один виток и были бы соединены в начале и в конце обмотки, то при расчетах вместо α_1 следовало бы брать общий, суммарный размер всех четырех (голых) проводов в направлении, перпендикулярном потокам рассеяния.

Тогда для расположения по рис. 141а размер α_1 увеличился бы до $4\alpha_1$, а число n_{a1} соответственно уменьшилось бы с 4 до 1. В результате добавочные потери возросли бы примерно в

$$\frac{1^2 - 0,2}{4^2 - 0,2} 4^4 \approx 16 \text{ раз,}$$

т. е. стали бы недопустимо большими. В таких случаях наилучшим средством борьбы с добавочными потерями является транспозиция проводов (подробно см. § 49), благодаря которой добавочные потери всегда можно снизить до той величины, которую дают формулы (116) и (117) для последовательного соединения витков в обмотке.

Значение K_F у хорошо выполненных стержневых трансформаторов с concentрическими обмотками не превосходит $1,02 \div 1,05$,

у броневых — часто бывает много больше ($1,2 \div 1,4$), так как в обмотках последних транспозиция проводов почти невыполнима. В высоковольтных обмотках маломощных трансформаторов при $\alpha_0 = 1 \div 2 \text{ mm}$ добавочные потери практически отсутствуют даже при большом числе слоев n_a обмотки; при этом $K_F \approx 1$.

По кривым рис. 142 можно определять для данной обмотки примерное значение добавочных потерь в процентах, и обратно, задаваясь допустимым процентом добавочных потерь, можно находить для сечения витка возможный размер α (или β), перпендикулярный Φ_s , при том или ином числе n_a слоев обмотки. Точный расчет следует вести по формулам (116) — (119).

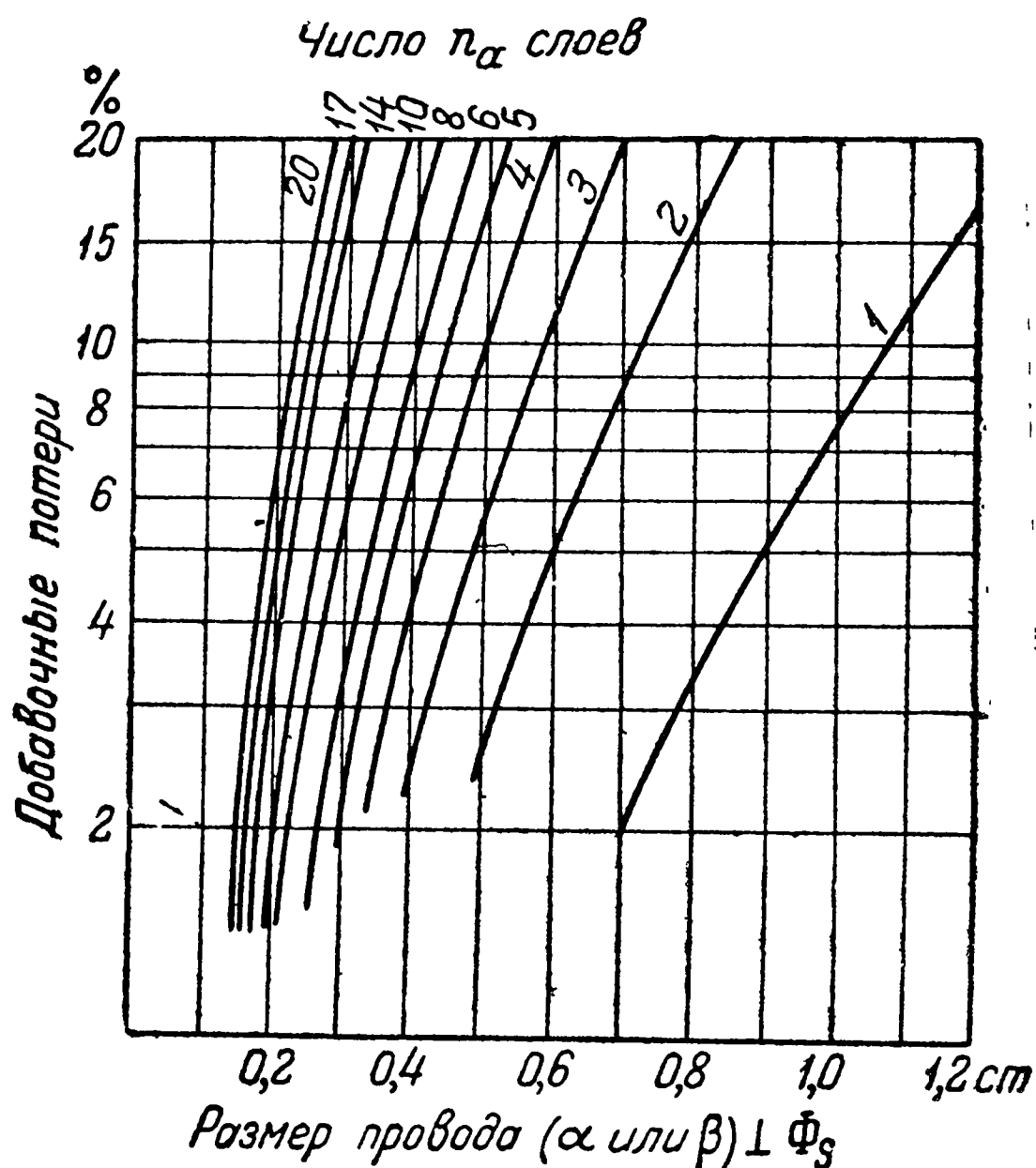


Рис. 142. Примерные значения добавочных потерь в обмотке в зависимости от того размера (α или β) сечения, который перпендикулярен потокам рассеяния для разного числа слоев в обмотке.

При этом нужно помнить, что эти формулы и кривые рис. 142 дают среднюю величину добавочных потерь во всей обмотке. Поскольку витки, расположенные вблизи промежутка δ_{12} , лежат в гораздо более сильном поле рассеяния — сравни на рис. 141а положение витков I и IV обмотки (I) — добавочные потери в витках, прилегающих к каналу δ_{12} рассеяния при большом n_a , могут быть гораздо больше средних потерь, примерно раза в три [Л. 1, стр. 299].

§ 73. Прочие добавочные потери при нагрузке

Продольные и поперечные потоки рассеяния обмотки пронизывают не только самую обмотку (§ 72), но также отводы, станину, стенки бака или кожуха и т. д., индуктируя во всех металлических деталях токи Фуко, создающие добавочные потери; при этом в деталях из магнитного материала возникают еще потери от гистерезиса. В баке потери будут тем больше, чем больше потоки рассеяния и чем ближе расположена обмотка к стенке бака.

Точный подсчет всех этих потерь представляет пока задачу неразрешенную; приводимые в литературе, например [Л. 155], формулы не всегда дают точные результаты. То же можно сказать и о формуле (120), выведенной американскими инженерами:

$$P_{\text{кд}} = \frac{k_{\delta} \cdot e_s^2 \cdot \Phi^2 \cdot l_1^3 \cdot f}{p_{\delta} \cdot [l_1 + 2(R_{\delta} - R)]^2 \cdot 50} \quad (120)$$

Здесь k_{δ} — коэффициент, учитывающий конструкцию бака:

Для баков волнистых и однофазных трансформаторов	$k_{\delta} = 1,64$
„ „ „ и трехфазных „	$k_{\delta}^{\text{тр}} = 3,00$
„ „ из толстых листов и однофазных „	$k_{\delta} = 1,0$
„ „ „ „ и трехфазных „	$k_{\delta} = 2,14$

p_{δ} — периметр бака в сантиметрах, R_{δ} — радиус бака в сантиметрах, R — средний радиус обмоток в сантиметрах, Φ — в мегамаксвеллах, l_1 — высота обмоток в сантиметрах.

У мощных высоковольтных трансформаторов с большой индуктивностью (а значит и большими потоками рассеяния), в особенности у трансформаторов трехобмоточных, рассматриваемые добавочные потери могут быть гораздо больше добавочных потерь $P_{\text{мд}}$ в самой обмотке и могут составлять до 25% всех потерь в обмотках.

Примерные цифры для трех однофазных трансформаторов I, II и III:

	I	II	III
Мощность трансформатора (kVA)	10 000	10 000	18 000
Напряжение U_1 (kV)	110	38	115
Напряжение короткого замыкания e_k (%)	12	9	10
Потери $P_{\text{кд}}$ в процентах от P_k	15	6	16

§ 74. Общие потери и их зависимость от нагрузки

Общие потери трансформатора при номинальной нагрузке:

$$P_{\Sigma} = P_0 + P_k \quad W, \quad (121)$$

где потери холостого хода:

$$P_0 = P_c + P_{0\partial} = k_0 \cdot P_c \quad (\S 68—69)$$

($k_0 = 1,1 \div 1,25$, см. § 69),

и потери короткого замыкания:

$$P_k = P_m + P_{m\partial} + P_{k\partial} = k_k \cdot P_m \quad (\S 71—73);$$

$k_k = 1,05 \div 1,25$ и будет меньше для малых трансформаторов без бака, без широкой регулировки напряжения и т. п.

Можно считать потери P_0 не зависящими от нагрузки, а потери P_k — пропорциональными квадрату нагрузки.

Если, следовательно, кратность нагрузки обозначить через x , то общие потери в трансформаторе составят:

$$P'_{\Sigma} = P_0 + x^2 \cdot P_k.$$

Если

$$\frac{P_0}{P_k} = \xi, \text{ то } P_0 = \xi \cdot P_k$$

и

$$P'_{\Sigma} = \xi \cdot P_k + x^2 \cdot P_k = P_k (\xi + x^2). \quad (122)$$

§ 75. К. п. д. трансформатора

Если кратность нагрузки по отношению к номинальной равна x , и угол сдвига фазы ее равен φ_2 , то к. п. д. трансформатора может быть выражен достаточно точно формулой:

$$\eta_x = \frac{x \cdot P \cdot \cos \varphi_2 \cdot 100}{x \cdot P \cdot \cos \varphi_2 + x^2 \cdot P_k + P_0} \% \quad (123)$$

Для $x = 1$, т. е. номинальной нагрузки и при $\cos \varphi_2 = 1$:

$$\eta_{1/1} = \frac{P \cdot 100}{P + P_k + P_0} \% \quad (124)$$

Прибавляя ± 100 к правой части равенства (123) и приводя к одному знаменателю, можно получить формулу более удобную для расчетов:

$$\eta_x = 100 - \frac{(x^2 \cdot P_k + P_0) 100}{x \cdot P \cdot \cos \varphi_2 + x^2 \cdot P_k + P_0} \% \quad (125)$$

Ясно, что к. п. д. трансформатора при $\cos \varphi_2$, отличном от 1, будет меньше, чем при $\cos \varphi_2 = 1$.

Так как потери P_k относятся условно к температуре обмоток $+75^\circ \text{C}$, то и к. п. д. относится к этой же температуре.

Как известно из теории, к. п. д. достигает максимального значения тогда, когда $x^2 \cdot P_k = P_0$. Это легко проверить, строя кривые потерь и к. п. д. для разных нагрузок как для $\cos \varphi_2 = 1$,

так и для обычно принимаемого значения $\cos \varphi_2 = 0,8$ (см. также § 8, задача 1).

Расчеты удобно расположить в виде таблицы (см. табл. 48).

Некоторый интерес представляет зависимость изменения к. п. д. от изменения общих потерь трансформатора P_Σ . Из выражения для η при $1/1$ нагрузки и $\cos \varphi_2 = 1$

$$\eta = 100 \frac{P}{P + P_\Sigma} \%$$

имеем:

$$d\eta = -100 \cdot \frac{P \cdot dP_\Sigma}{(P + P_\Sigma)^2} \approx -100 \frac{dP_\Sigma}{P + 2P_\Sigma},$$

а для конечных изменений:

$$\Delta\eta = -100 \frac{\Delta P_\Sigma}{P + 2P_\Sigma} \% \quad (126)$$

Так как согласно ОСТ 2524 потери трансформаторов гарантируются с точностью $\pm 10\%$, то к. п. д. при этом будет изменяться следующим образом:

Мощность трансформатора kVA	Общие потери P_Σ kW	Изменение к. п. д. $\Delta\eta\%$ при изменении потерь P_Σ на $\pm 10\%$
100	3	$\pm 0,283\%$
1 000	20,1	$\pm 0,193\%$

С. НАПРЯЖЕНИЕ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ И ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

§ 76. Активные сопротивления обмоток

Активные сопротивления обмоток на фазу подсчитываются проще всего из общих потерь для данной обмотки:

$$r_1 = \frac{P_{m1} + P_{m\partial 1}}{m \cdot I_{1\phi}^2} \Omega, \quad r_2 = \frac{P_{m2} + P_{m\partial 2}}{m \cdot I_{2\phi}^2} \Omega. \quad (127)$$

Зная сопротивления r_1 и r_2 , можно вычислить и общее активное сопротивление трансформатора при коротком замыкании:

$$r_k = r_1 + r_2 \cdot k_{12}^2, \quad (128)$$

где $k_{12} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}$.

При этом проще приводить сопротивления к первичной (в данном случае высоковольтной) обмотке, так как для низковольтной обмотки получаются — в особенности для мощных трансформаторов — весьма небольшие значения сопротивлений, неудобные для пользования ими.

Нужно заметить, что после приведения сопротивления r_2 к обмотке (1), получающаяся величина $r'_2 = r_2 \cdot k_{12}^2$ должна быть

близка к величине r_1 и, во всяком случае, не должна отличаться от нее больше, чем в $1\frac{1}{2}$ раза; при чередующихся обмотках и при $\Delta_2 = \Delta_1$ будет точно $r'_2 = r_1$. Если же при приведении получается иной результат, значит где то была допущена ошибка.

§ 77. Напряжение короткого замыкания и треугольник короткого замыкания

Зная величину r_k (§ 76) трансформатора, можно найти слагающую падения напряжения в сопротивлении r_k , т. е. $E_r = r_k \cdot I_\phi$, и ее процентное значение:

$$e_r = \frac{r_k \cdot I_\phi \cdot 100}{U_\phi} \% \quad (129)$$

где I_ϕ и U_ϕ — ток и напряжение той обмотки, к которой приводилось сопротивление другой обмотки.

Очевидно:

$$e_r = \frac{r_k \cdot I_\phi \cdot 100}{U_\phi} = \frac{r_k \cdot I_\phi^2 \cdot 100}{U_\phi \cdot I_\phi} \approx \frac{P_m + P_{m\partial}}{P} \cdot 100\%, \quad (130)$$

т. е. слагающая падения напряжения в сопротивлении r_k составляет такой же процент от рабочего напряжения, какой составляют потери в обмотке от мощности трансформатора.

Зная величину $e_s\%$ (§ 53) трансформатора, можно определить:

$$x_k = e_s \cdot \frac{U_\phi}{I_\phi \cdot 100} \quad (131)$$

$$\text{и} \quad E_s = x_k \cdot I_\phi \text{ В.} \quad (132)$$

Напряжение короткого замыкания трансформатора, именуемое иногда падением напряжения (при коротком замыкании), определится как $E_k = \sqrt{E_r^2 + E_s^2}$, а его процентное значение — в процентах от первичного напряжения — будет равно:

$$e_k = \frac{E_k \cdot 100}{U_\phi} = \sqrt{e_r^2 + e_s^2} \% \quad (133)$$

Для нормальных трансформаторов по ОСТ 2524 величина e_k колеблется в пределах $5,5 \div 14\%$ (см. также § 16, п. 8).

По значениям E_r , E_s и E_k можно построить треугольник короткого замыкания трансформатора и определить угол φ_k по $\cos \varphi_k \approx E_r : E_k$, причем для трехфазных трансформаторов следует иметь в виду, что r_k , E_r и т. д. представляют фазные значения сопротивлений, падений напряжения и т. д.

Чем больше рабочее напряжение трансформатора, тем больше E_s по сравнению с E_r , и тем больше угол φ_k .

Очевидно, что $e_k \equiv z_k \cdot I$, т. е. величина e_k возрастает пропорционально мощности данной модели трансформатора (см. также § 16, п. 8).

§ 78. Процентное изменение напряжения

Процентное изменение напряжения трансформатора выражается, как известно [см., например, Л. 2, стр. 105], в виде:

$$\Delta u = e_r \cos \varphi_2 \pm e_s \sin \varphi_2 + \frac{(e_s \cos \varphi_2 \mp e_r \sin \varphi_2)^2}{200} \% \quad (134)$$

Верхние знаки — для нагрузки с отставанием по фазе, нижние — для нагрузки с опережением.

При чисто активной нагрузке $\cos \varphi_2 = 1$, $\sin \varphi_2 = 0$; тогда:

$$\Delta u = e_r + \frac{e_s^2}{200} \% \quad (135)$$

Значение второго слагаемого в формуле (135) и значение последнего слагаемого в формуле (134) невелико и составляет

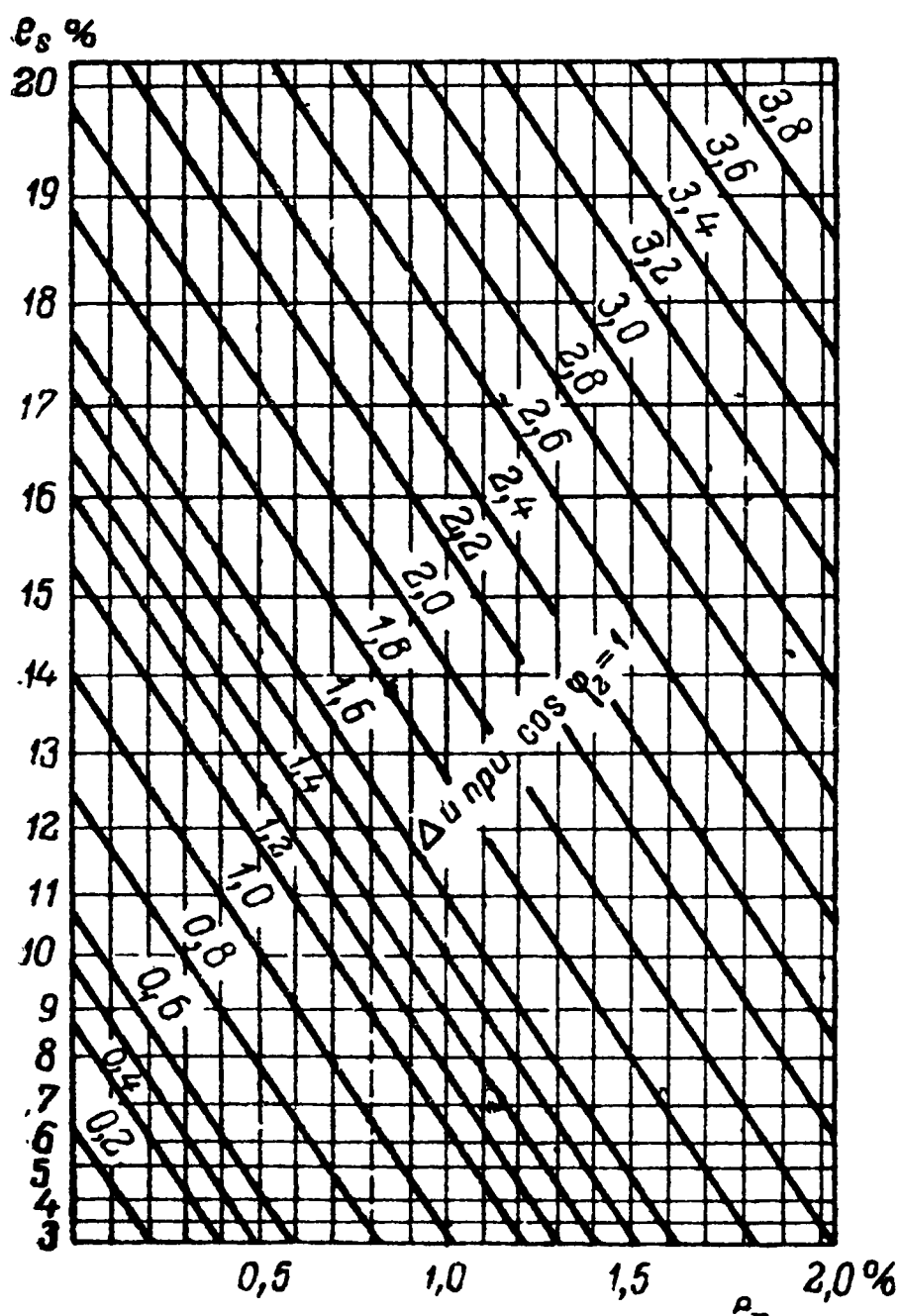


Рис. 143. Процентное изменение Δu напряжения трансформатора при $1/1$ нагрузки и $\cos \varphi_2 = 1$.

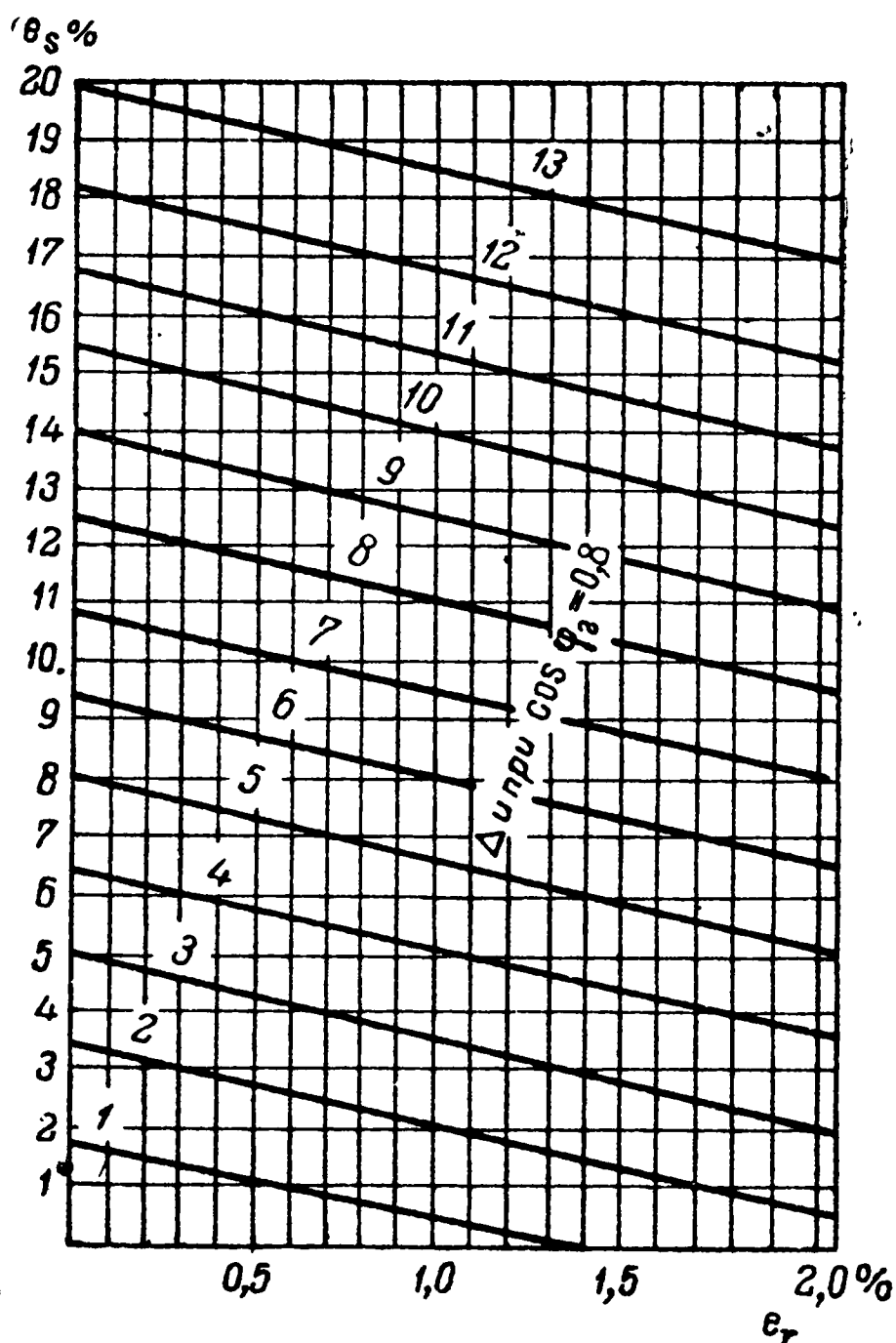


Рис. 144. Процентное изменение Δu напряжения трансформатора при $1/1$ нагрузки и $\cos \varphi_2 = 0,8$.

примерно $0,05 \div 0,25\%$; поэтому при приближенных расчетах им иногда пренебрегают. Из формулы (134) видно, что при больших значениях e_s по сравнению с e_r и обычных значениях $\cos \varphi_2 = 0,6 \div 0,8$ величина Δu целиком определяется значением e_s .

При изменении фазы φ_2 нагрузки изменяется и Δu ; на рис. 214

приведена кривая изменения $\Delta u = f(\varphi_2)$ для трансформатора примера 1, причем $e_r = 2,39\%$ и $e_s = 2,73\%$.

Для приблизительной оценки величины Δu можно пользоваться графиками рис. 143 и 144; первый для $\cos \varphi_2 = 1$, второй для $\cos \varphi_2 = 0,8$ (отставание).

ГЛАВА X

ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

§ 79. Источники тепла в трансформаторах; охлаждающая среда

Все потери трансформатора превращаются в теплоту. По относительной величине потери в обмотках являются обычно доминирующими; поэтому можно рассматривать обмотки, как главный очаг тепла в трансформаторе; вторым очагом является сердечник. Остальные источники потерь и тепла имеют меньшее значение; впрочем у мощных и специальных трансформаторов учитывают все потери, и при проектировании внимательно „изыскивают“ все возможные места нагревания.

Для обмоток и для сердечника стараются обеспечить взаимно независимое охлаждение; поэтому в дальнейшем будет считаться исключенной возможность взаимной передачи тепла между сердечником и обмотками.¹ Это будет в особенности справедливо для трансформаторов с масляным охлаждением, у которых вполне можно пренебречь излучением тепла сердечником и обмоткой.²

Охлаждающей средой для трансформаторов является окружающий воздух или вода; для ограничения максимальных температур в трансформаторе при расчетах принимают температуру окружающего воздуха $+35^\circ \text{C}$, а воды $+25^\circ \text{C}$ (§ 81).

§ 80. Путь теплового потока; общая картина распределения перепадов температур в трансформаторах

При установившемся тепловом режиме трансформатора возникает равномерный переход тепла от всех источников последнего (§ 79) к тем местам, где оно может выделяться во вне трансформатора, например, на поверхностях обмоток и сердечника у трансформаторов с воздушным охлаждением и на стенках бака или иного охладителя — у трансформаторов с масляным охлаждением. В разных точках на пути тепла устанавливаются различные температуры ϑ и превышения температуры

¹ При работе с номинальной мощностью.

² Как известно, в противоположность этому в электрических машинах приходится всегда считаться с передачей тепла между сердечником (якорем, статором) и обмоткой, лежащей в его пазах; отсюда — разница в некоторой части тепловых расчетов для трансформаторов по сравнению с расчетами для электрических машин.

$\vartheta - \vartheta_0 = \tau$ над температурой ϑ_0 охлаждающей среды. На определенных участках пути тепла имеют место определенные перепады температур τ — разности тепловых потенциалов.

Общая картина распределения температур в трансформаторе довольно сложна; она зависит от типа и конструкции трансформатора и от системы охлаждения. Для трансформаторов с есте-

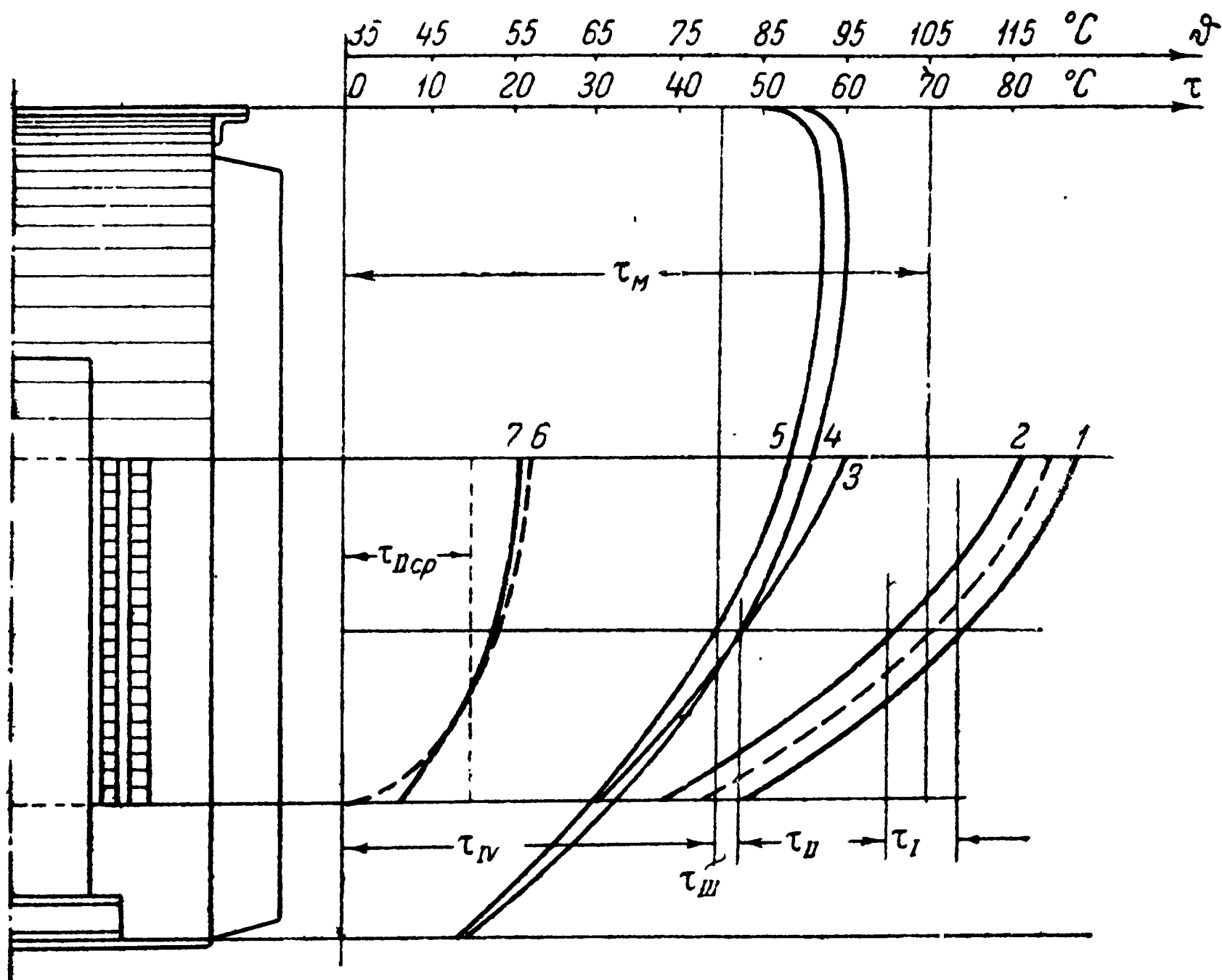


Рис. 145. Примерное распределение температур ϑ и превышений температуры τ внутри трансформатора с естественным масляным охлаждением и волнистым баком: кривая 1 — температура наиболее горячего слоя обмотки; кривая 2 — температура поверхности обмотки; кривая 3 — температура масла в канале обмотки; кривая 4 — температура масла у стенки бака; кривая 5 — температура на наружной поверхности бака; 6 — теоретическая кривая для τ_{II} ; 7 — действительная кривая для τ_{II} .

ственным масляным охлаждением и волнистым баком примерное распределение температур ϑ и превышений τ температуры приведено на рис. 145. Из последнего видно, что можно говорить о температурах, превышениях и перепадах температуры в данной точке или, соответственно, на данном участке пути тепла, а также о максимальных и средних значениях этих величин для всего трансформатора; нужно уметь находить все эти величины путем расчета.

Для обмоток нужно знать среднее превышение температуры,¹

¹ Среднее превышение температуры обмоток определяется по измерению сопротивления их в горячем и холодном состоянии.

так как оно определяется при опытах с нагреванием трансформатора и служит критерием его тепловой прочности (§ 81). Но существенное значение имеет и максимальное превышение температуры и сами максимальные температуры обмоток, сердечника и масла (для трансформаторов с масляным охлаждением); для первых потому, что их температуры лимитируются теплостойкостью примененных изолирующих материалов, а для масла потому, что перегревы его, даже местные, могут сильно снизить его качества (§ 58). О связи между максимальными и средними температурами см. § 99.

Общий метод расчета температур заключается в следующем.

В соответствии с естественным подразделением всего пути тепла на такие участки, на которых передача тепла происходит единообразным процессом (ср. § 82), общее превышение температуры разделяют на такие перепады, которые могут быть в отдельности легко подсчитаны, а затем их суммируют.

Различают следующие (средние) перепады температуры: для сердечников и обмоток τ_I — от наиболее горячей точки до поверхности, отдающей тепло, и τ_{II} — от этой поверхности к охлаждающей среде (воздух, масло); для масла τ_{III} — от масла к стенке охладителя (бака и т. п.); для бака (или иного охладителя) τ_{IV} — от стенки бака или охладителя к охлаждающей среде (воздух, вода).

Так как для трансформаторов с водяным охлаждением превышение температуры, согласно Правилам и Нормам, определяется относительно температуры входящей воды, а все расчеты ведутся по средним значениям температур, то следует учесть еще нагрев воды τ_v , т. е. разность температур выходящей и входящей воды; средняя температура воды будет на $\frac{\tau_v}{2}$ °C выше температуры входящей воды.

Определив отдельно указанные выше перепады температуры, находят:

а) для трансформаторов с воздушным охлаждением — среднее превышение температуры обмоток $\tau_I + \tau_{II}^1$ и, если нужно, максимальное превышение температуры $\tau_{I\ m} + \tau_{II\ m}^1$

б) для трансформаторов с масляным охлаждением — среднее $\tau_{III} + \tau_{IV}$ и максимальное $\tau_{III} + \tau_{IV\ m}$ превышение температуры масла и среднее $\tau_I + \tau_{II} + \tau_{III} + \tau_{IV}$ и максимальное $\tau_{I\ m} + \tau_{II\ m} + \tau_{III} + \tau_{IV\ m}$ превышение температуры обмоток;¹

с) для трансформаторов с водяным охлаждением масла — среднее $\tau_{III} + \tau_{IV} + \frac{\tau_v}{2}$ и максимальное $\tau_{III} + \tau_{IV\ m} + \frac{\tau_v}{2}$ превышение температуры масла и среднее $\tau_I + \tau_{II} + \tau_{III} + \tau_{IV} + \frac{\tau_v}{2}$ и

¹ То же определяется для сердечника.

максимальное $\tau_{I\text{ м}} + \tau_{II\text{ м}} + \tau_{III} + \tau_{IV} + \frac{\tau_V}{2}$ превышение температуры обмоток;¹ все превышения — над температурой входящей охлаждающей воды.

§ 81. Допустимые по нормам температуры и превышения температуры

Согласно § 8 Правил и Норм: „Наибольшие наблюдаемые температуры и наибольшие превышения температуры частей трансформатора для работы в местах, где температура охлаждающей среды не превосходит 35°С для воздуха и 25°С для воды, указаны в табл. 36.

Т а б л и ц а 36

№ по пор.	Класс ² изолирующего материала или название части трансформатора	Наибольшая наблюдаемая температура в °С	Наибольшее превышение температуры в °С	Метод измерения
1	Класс О	80	45	По методу сопоставления
2	„ А	—	—	
	а) обмотки, не погруженные в масло	95	60	
	б) обмотки, погруженные в масло	105	70	
3	Класс В	115	80	
4	„ С	Ограничены таким нагревом, при котором температура соседних изолированных частей, а также превышение температуры, не превосходит допускаемого для них предела		По методу термометра
5	Постоянно замкнутые накоротко обмотки:			
	а) изолированные	Как в п. 1—3		
	б) неизолированные	„ „ „ 4		
6	Железный сердечник:			
	а) соприкасающийся с обмотками	„ „ „ 1—3		
	б) не соприкасающийся с обмотками и не погруженный в масло	95	60	
	в) погруженный в масло	110	75	
7	Масло	95	60	

П р и м е ч а н и я

1. Нормы наибольших превышений температуры относятся ко всем новым трансформаторам, независимо от рода охлаждения.

¹ То же определяется для сердечника.
² См. § 57.

2. В масляных трансформаторах с водяным охлаждением, только что построенных, наблюдаемые температуры должны быть на 10°C ниже тех наибольших наблюдаемых температур, которые приведены в таблице, так как во время работы условия охлаждения трансформатора водою неизбежно ухудшаются, и температура растет.

Данными табл. 36 пользуются при всех тепловых расчетах трансформаторов, причем из-за возможной неточности тепловых расчетов, а также ошибок при опытным определении превышений температуры в расчетах можно брать запас в $2\div 3^\circ\text{C}$.

§ 82. Процессы передачи тепла в трансформаторах ¹

На отдельных участках всего пути тепла в трансформаторах (§ 81) теплопередача может происходить различно в зависимости от того, какой из основных процессов теплопередачи имеет место на данном участке, а именно передача: через теплопроводность, через излучение и через конвекцию. Иногда могут одновременно происходить два процесса, например — второй и третий.

Для количественного выражения этих процессов вводятся следующие основные величины и определения.

а. Тепловой поток Q , т. е. количество тепла в джоулях в секунду (в ваттах), проходящее сквозь некоторую поверхность O ; последняя измеряется в кв. метрах или кв. сантиметрах, смотря по удобству расчета. В большинстве случаев эта поверхность является активной поверхностью охлаждения (обмотки, сердечника, бака и т. д.).

б. Плотность теплового потока или удельная тепловая нагрузка поверхности охлаждения:

$$q = \frac{Q}{O}, \quad (136)$$

считаемая в ваттах на 1 м^2 или на 1 см^2 . Величина q является основой в большинстве тепловых расчетов.

с. Теплоемкость c в джоулях на 1 кг и 1°C , принимая 1 большую калорию эквивалентной 4180 J.

При помощи определений а, б и с можно дать основным процессам теплопередачи следующее выражение.

1. Передача теплоты через теплопроводность. Если стенка из однородного теплопроводящего вещества, для простоты считающаяся плоской, имеет толщину $x\text{ см}$, и на обеих боковых поверхностях ее, равных (каждая) $O\text{ см}^2$ (размеры этих поверхностей принимаются достаточно большими по сравнению с x), постоянно поддерживаются температуры ϑ_1 и ϑ_2 , то сквозь стенку установится постоянное течение тепла параллельными струями от более горячей к более холодной поверхности, причем имеет место

¹ В противоположность принятому в книге значению индексов, в гл. X и XI приняты индексы: 1 — для наибольшей и 2 — для наименьшей температуры, k — для конвекции и α — для излучения.

зависимость:

$$Q_{\lambda} = (\vartheta_1 - \vartheta_2) \cdot \frac{O \cdot \lambda}{x} \text{ J/s, }^1 \quad (137)$$

где λ — теплопроводность вещества стенки.

Если основные величины измерять в джоулях, секундах и сантиметрах, то размерность λ будет:

$$\frac{\text{J} \cdot \text{cm}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}} = \frac{\text{W}}{\text{cm} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Значения λ для различных материалов, применяемых в трансформаторостроении, приведены в табл. IV в приложении; при температурах, встречающихся в трансформаторах, можно считать, что λ не зависит от температуры (для масла — см. кривую рис. 149).

Из формулы 137 имеем:

$$\frac{Q_{\lambda}}{O} = q = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{x} \cdot \lambda,$$

а, вводя значение перепада температур $\tau = \vartheta_1 - \vartheta_2$, получаем окончательно:

$$\tau = q \cdot \frac{x}{\lambda} ^\circ\text{C}. \quad (138)$$

Это есть основная формула для подсчета перепада τ температур при теплопередаче через теплопроводность в указанных выше условиях.

Закон теплопередачи (формула 137) в дифференциальной форме выразится следующим образом:

$$Q_{\lambda} = -\lambda \cdot \frac{d\vartheta}{dx} \cdot O; \quad (139)$$

течение теплоты — вдоль оси x в направлении падения температуры, вследствие чего с правой стороны стоит знак минус.

2. Передача теплоты через излучение. Строго говоря, излучение физических тел не следует простому закону [Л. 156,

¹ Эта зависимость аналогична закону Ома для электрического тока. Действительно, ее можно представить в виде:

$$Q_{\lambda} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\frac{x}{O \cdot \lambda}} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{\frac{x \cdot \rho_{\vartheta}}{O}} = \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{R_{\vartheta}}.$$

В левой части вместо тока i стоит тепловой поток Q_{λ} , в правой — вместо разности потенциалов стоит разность температур $\vartheta_1 - \vartheta_2$; в знаменателе — вместо электрического сопротивления $r = \frac{l \cdot \rho}{S}$, где l — длина провода, S — сечение его, а ρ — удельное сопротивление, стоит „тепловое сопротивление“ R , причем ρ_{ϑ} есть удельное тепловое сопротивление в „термических омах“ на 1 cm^3 , если $\vartheta_1 - \vartheta_2$ выражено в $^\circ\text{C}$. Величина „термический ом“ входит уже в теплотехнику, но в дальнейшем автор оперирует преимущественно с теплопроводностью λ как величиной, пока более привычной читателю.

стр. 12], однако, для приближенных технических расчетов и при подсчете излучения тел, не имеющих глубоких впадин, можно пользоваться законом Стефана-Больцмана:

$$Q_u = C' \cdot O_1 \cdot \left[\left(\frac{\theta_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_2}{100} \right)^4 \right] \text{ W}, \quad (140)$$

где C' — постоянная излучения, а θ_1 и θ_2 — абсолютные температуры излучающего тела и того, которое получает тепло Q_u через излучение от первого.

По Нуссельту (Nusselt) [Л. 157]:

$$\frac{1}{C'} = \frac{1}{C_1} + \frac{O_1}{O_2} \left(\frac{1}{C_2} - \frac{1}{C} \right) \frac{W}{\text{m}^2 \cdot (^\circ\text{C})^4}. \quad (141)$$

Здесь C — постоянная излучения абсолютно черного тела, C_1 и C_2 — постоянные излучения обоих данных тел, O_1 и O_2 — поверхности излучения обоих данных тел.

Для трансформаторных баков, окрашенных черной краской, и для трансформаторов с воздушным охлаждением можно считать $C_1 = 5,1$; для штукатуренных стен $C_2 = 5,0$; по новейшим данным $C = 5,65$. При этом для значения отношения O_1/O_2 от 0 до 1 значения C' будут лежать в пределах $4,63 \div 5,1$, а в среднем $4,87 \frac{W}{\text{m}^2 \cdot (^\circ\text{C})^4}$.

Строго говоря, этот расчет подходит лишь для теплоизлучения трансформаторов, стоящих в камерах; для трансформаторов на открытых подстанциях можно считать $O_2 = \infty$, тогда $C' = C_1 = 5,1$; однако для надежности (разные свойства красок, которыми может быть окрашен бак) берут и в этом случае $C' = 4,87 \frac{W}{\text{m}^2 \cdot (^\circ\text{C})^4}$.

Формула (140) неудобна для расчетов; вместо нее пользуются более простой:

$$Q_u = K_u \cdot O \cdot (\theta_1 - \theta_2) = K_u \cdot O \cdot (\vartheta_1 - \vartheta_2) = K_u \cdot O \cdot \tau \text{ W}. \quad (142)$$

Коэффициент K_u определится так:

$$K_u = C' \cdot \frac{\left(\frac{273 + \vartheta_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + \vartheta_2}{100} \right)^4}{\vartheta_1 - \vartheta_2} \frac{W}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Зависимость K_u от $\vartheta_1 - \vartheta_2$ при разных ϑ_2 приведена в табл. 37.

Таким образом, K_u зависит от окружающей температуры. Если, например, $\vartheta_1 = +10^\circ\text{C}$, а $\vartheta_2 = 0^\circ\text{C}$, то $\theta_1 - \theta_2 = (273 + 10) - 273 = 10^\circ\text{C}$, а $\left(\frac{\theta_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_2}{100} \right)^4 = 8,7$.

Если же тело нагреть до $\vartheta_1 = +60^\circ\text{C}$, а среду до $\vartheta_2 = +50^\circ\text{C}$, то опять будет: $\theta_1 - \theta_2 = (273 + 60) - (273 + 50) = 10^\circ\text{C}$, тогда как

$$\left(\frac{\theta_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{\theta_2}{100} \right)^4 = 14,$$

т. е. теплопередача увеличится в $14/8,7 = 1,61$ раз.

Все расчеты принято вести для окружающей температуры $+20^{\circ}\text{C}$, считая, что при более высоких температурах мы имеем запас в виде увеличения K_u , а при более низких — в самой снизившейся температуре. По табл. 37 построена кривая *a* рис. 146, из которой, например, видно, что при $\vartheta_2 = +20^{\circ}\text{C}$ и $\vartheta_1 - \vartheta_2 = 45^{\circ}\text{C}$ $q = \frac{Q}{O} = 280 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$; см. формулу (136).

Таблица 37

$\vartheta_1 - \vartheta_2$ $^{\circ}\text{C}$	Значения K_u при ϑ_2 , равном		
	10 C	20°C	30°C
5	4,63	5,03	5,55
10	4,65	5,16	5,69
20	4,91	5,42	5,98
30	5,17	5,71	6,28
40	5,44	6,05	6,59
50	5,73	6,30	6,91
60	6,03	6,62	7,25

3. Передача теплоты через конвекцию.

Это явление сложнее описанных в п. 1 и 2. Особенно сложно явление конвекции в масле, потому что коэффициент конвекции K_k в сильной степени зависит от свойств охлаждающей среды, а именно ее теплопроводности, теплоемкости, плотности и вязкости; вязкость же масла сильно изменяется с температурой и различна для разных сортов масла. Явление усложняется еще тем, что в трансформаторах теплопередача через конвекцию происходит между слоями масла, взаимно передвигающимися с различными для разных слоев скоростями.

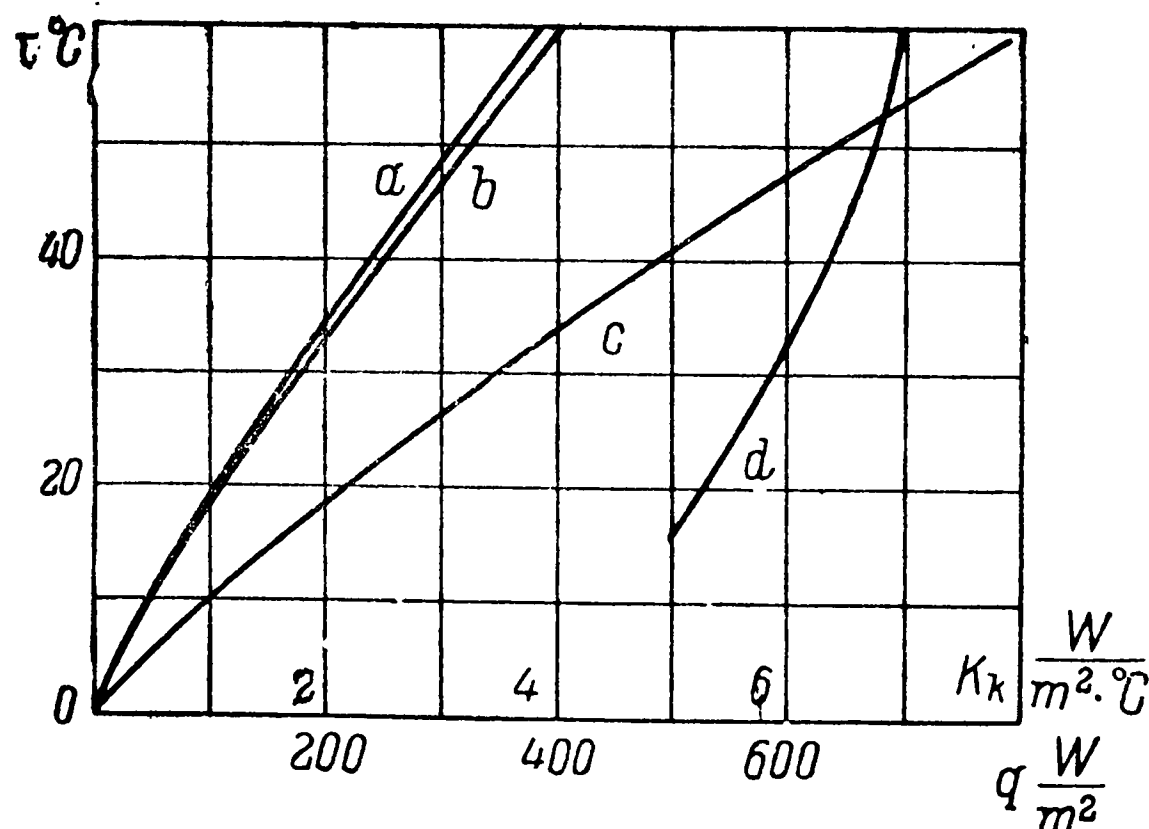


Рис. 146. Теплоотдача в спокойном воздухе при $+20^{\circ}\text{C}$: *a* — излучение, *b* — конвекция, *c* — излучение и конвекция, *d* дает $K_k = f(\tau)$.

Можно считать установленными следующие положения.

а. Коэффициент K_k примерно пропорционален $\sqrt[4]{\tau}$ (есть однако указания — работы ВЭИ в Москве, что K_k изменяется гораздо значительнее с изменением τ ; см. ниже).

б. K_k для вертикальных поверхностей на 15 ÷ 20% больше, чем для горизонтальных.

с. Высота H_k омываемой поверхности влияет на величину K_k ,

причем можно считать $K_k \equiv \frac{1}{\sqrt[4]{H_k}}$, однако относительно значения величины H_k мнения расходятся. Вообще под H_k понимают ту высоту, на которую струи охлаждающей среды поднимаются

вдоль охлаждаемой поверхности, не отрываясь от нее. М. Видмар считает [Л. 4, стр. 323] для масла и воздуха $H_k = 0,15$ м, Рихтер [Л. 20, стр. 236] дает для масла $H_k = 0,5$ м; по проф. Л. М. Пиотровскому [Л. 2, стр. 179] для масла и воздуха $H_k = 1,0$ м. По всей вероятности разница происходит вследствие трудности экспериментирования и различных условий опытов. Следует также иметь в виду, что самый коэффициент K_k не постоянен для всей поверхности, так как внизу τ больше, чем вверху. Рис. 147 [Л. 158] дает понятие о распределении значения K_k вдоль поверхности, высотой 50 см, омываемой свободным воздухом; примерно подобная же картина будет и для масла.

Несомненно, величина H_k не может быть одинаковой для масла и для воздуха; она будет различной и для разных поверхностей (обмоток, бака и т. д.).

Для воздуха коэффициент K_k Нуссельт [Л. 159] и Генки (Z. Nepsky) [Л. 160] принимают равным $2,55 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$.

Примерно то же самое дает М. Видмар своей формулой:

$$K_k = 2,7 \cdot \sqrt[4]{\frac{\tau}{H_k}} \quad (143)$$

[Л. 4, стр. 318], если считать $H_k = 1,5$ dm.

Новейшие исследователи дают меньшие значения для K_k , а именно: по Монтзингеру (Montsinger) [Л. 161] $K_k = 2,17 \cdot \tau^{\frac{1}{4}}$, по Гриффитсу и Дэвису (Griffiths and Davis) [Л. 158] $K_k = 2,05 \tau^{\frac{1}{4}}$. Рихтер считает $K_k = 7 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ для обычных значений τ . В дальнейшем (см. кривую *b* рис. 146) принята средняя цифра:

$$K_k = 2,5 \cdot \tau^{\frac{1}{4}} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}, \quad (144)$$

что дает, например, для $\tau = 45^\circ C$:

$$K_k = 6,5 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}. \quad (145)$$

Для одновременного излучения и конвекции в воздухе с гладкой поверхностью общее количество отдаваемого тепла близко следует закону:

$$Q_u + Q_k \equiv \tau \cdot \tau^{\frac{1}{4}} = \tau^{\frac{5}{4}}$$

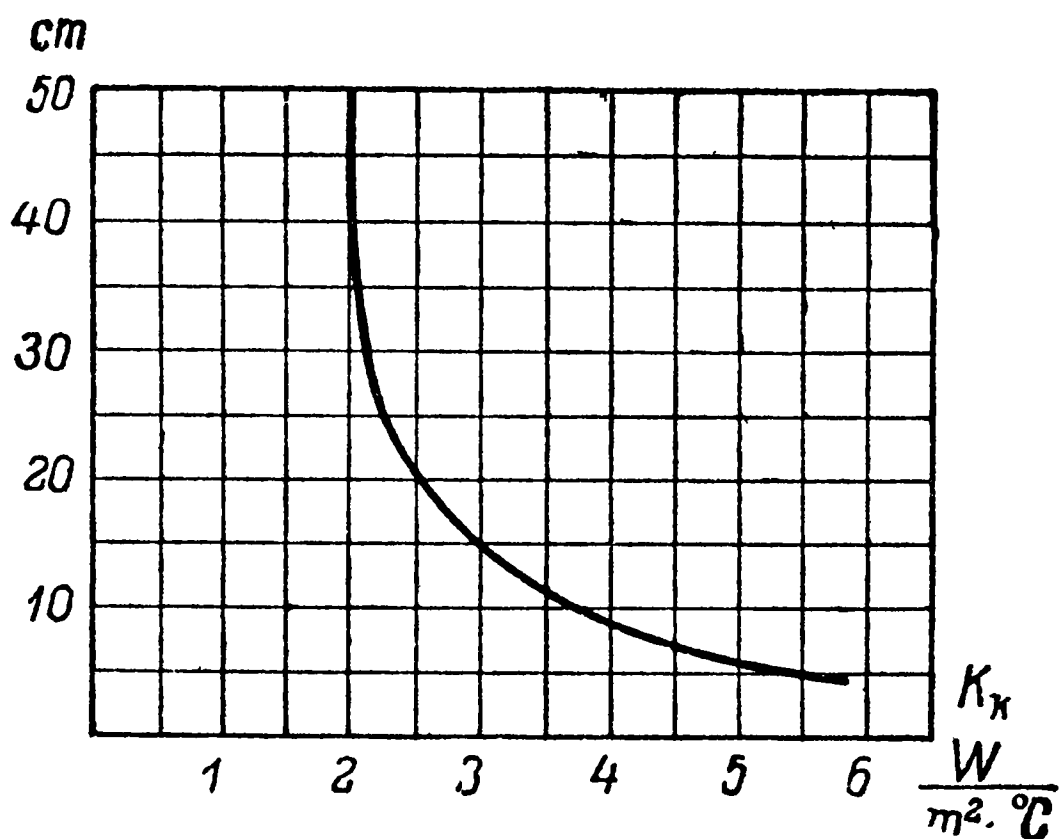


Рис. 147. Значения коэффициента K_k конвекции вдоль высоты вертикальной стенки.

(кривая *c* рис. 146), что найдет себе ниже (§ 94, п. 4) важное применение; кривая *d* рис. 146 — общий коэффициент теплоотдачи для гладкой поверхности.

Гораздо сложнее обстоит дело с конвекцией в трансформаторном масле. На основе теории „поверхностного слоя“ Райса (Rice) и Лангмюира (Langmuir) Н. Е. Лысов выводит [Л. 162, стр. 20] следующую формулу теплопередачи в масле с вертикальной цилиндрической поверхности:

$$q = 0,11 \cdot \frac{\lambda_{mc}^{0,75}}{\zeta_{mc}^{0,41}} \cdot \tau^{1,33} \frac{W}{m^2}, \quad (146)$$

где τ имеет прежнее значение, λ_{mc} — теплопроводность масла, а ζ_{mc} — вязкость его.

Обе последние величины, как указывалось выше, зависят от сорта масла и температуры его. На рис. 148 [Л. 162] приведена

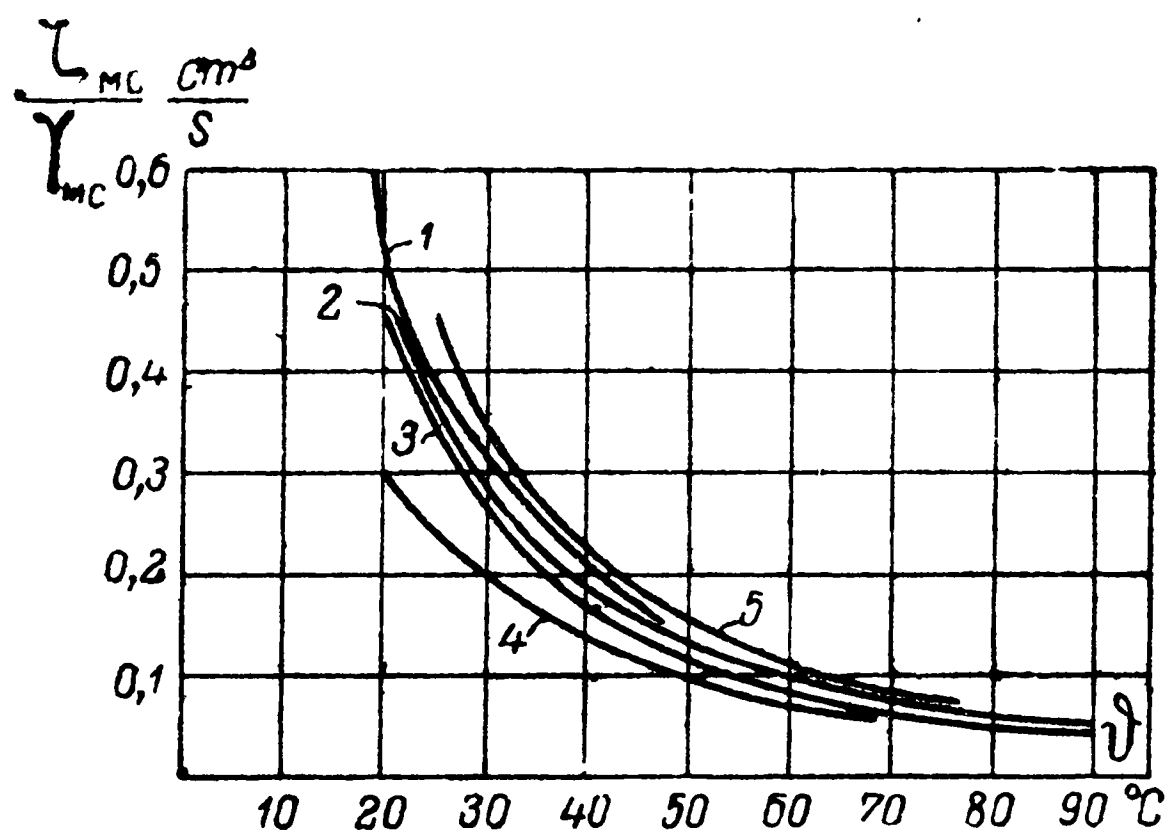


Рис. 148. Изменение кинематической вязкости ζ_{mc}/γ_{mc} различных сортов трансформаторных масел в зависимости от температуры: 1 — эмбинское свежее, 2 — нефтесиндиката „Экстра“ свежее, 3 — французское свежее, 4 — американское свежее, 5 — бакинское, окисленное в течение 125 час.

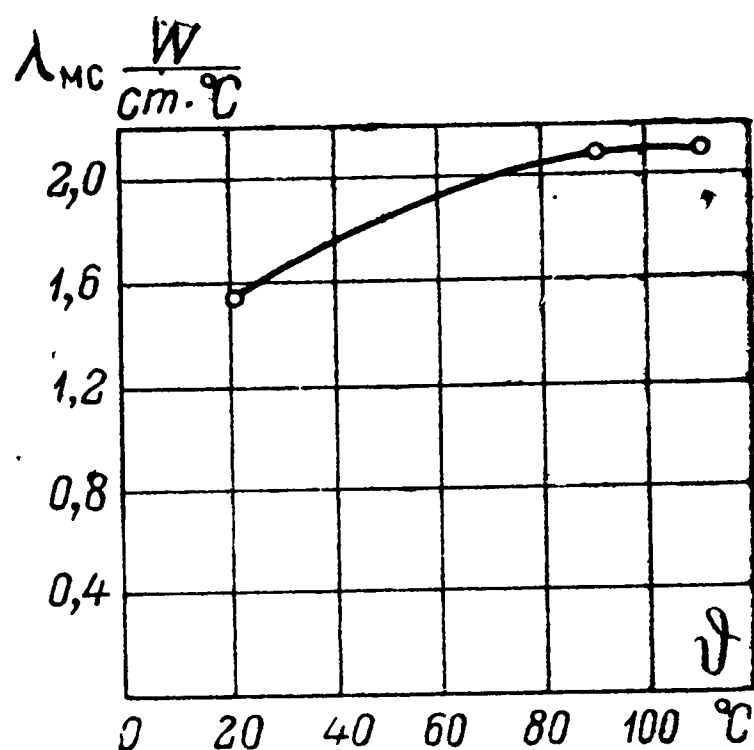


Рис. 149. Изменение теплопроводности λ_{mc} масла в зависимости от температуры.

зависимость $\zeta_{mc}/\gamma_{mc} = f_1(\vartheta)$, где ζ_{mc}/γ_{mc} — так называемая кинематическая вязкость масла и γ_{mc} — удельный вес его; на рис. 149 показана зависимость теплопроводности λ_{mc} от температуры [Л. 163].

Если принять для наибольшего превышения температуры масла 58°C (по нормам 60°C) и учесть, что среднее превышение τ_{mc} будет в 1,2 раза меньше (§ 99), тогда $\tau_{mc} = \frac{58}{1,2} = 49^\circ\text{C}$.

Если еще температуру окружающего воздуха принять за $+20^\circ\text{C}$, то средняя температура масла в трансформаторе с естественным

масляным охлаждением будет равна $20 + 49 = 69^\circ \text{C}$. Для этой температуры по кривой 2 рис. 148:

$$\frac{\zeta_{mc}}{\gamma_{mc}} = 0,08 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}, \quad \gamma_{mc} = 0,89 \frac{\text{G}}{\text{cm}^3}, \quad \zeta_{mc} = 0,071 \frac{\text{G}}{\text{cm} \cdot \text{s}},$$

а по кривой рис. 149:

$$\lambda_{mc} = 0,002 \frac{\text{W}}{\text{cm} \cdot ^\circ \text{C}}.$$

Поэтому:

$$q = 0,11 \cdot \frac{0,002^{0,75}}{0,071^{0,41}} \tau^{1,33} = 0,00306 \tau^{1,33} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

или

$$q = 30,6 \cdot \tau^{1,33} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}. \quad (147)$$

Если окружающая температура снизится на 25°C , т. е. до -5°C , а средняя температура масла до $69 - 25 = 44^\circ \text{C}$, то аналогично предыдущему:

$$q = 20 \cdot \tau^{1,33} \frac{\text{W}}{\text{m}^2},$$

т. е. в 1,5 раз меньше, чем в первом случае; это обозначает, что при том же q величина τ будет в $1,5^{\frac{3}{4}} = 1,36$ раз больше.

На этом примере выявляется большая зависимость конвекции от вязкости масла.

Большинство других исследователей считают показатель степени при τ равным $1,25 = \frac{5}{4}$. Для коэффициента K_k даются разные значения. Для горизонтальных поверхностей по Кюхлеру (Küchler) [Л. 164]:

$$K_k = 38 \cdot \tau^{\frac{1}{4}} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ \text{C}}, \quad (148)$$

для вертикальных по Рихтеру:

$$K_k = 40,3 \sqrt[4]{\frac{\tau}{H_k}},$$

где H_k в метрах, что при $H_k = 0,5 \text{ m}$ дает:

$$K_k = 48 \cdot \tau^{\frac{1}{4}} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ \text{C}}. \quad (149)$$

Окончательно для закона теплопередачи через конвекцию в масле принимаются следующие выражения (с указанными выше оговорками). Для горизонтальных поверхностей:

$$q = 38 \cdot \tau^{5/4} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}, \quad (150)$$

для вертикальных:

$$q = 48 \cdot \tau^{5/4} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}. \quad (151)$$

Прилагая эти выражения к поверхности охлаждения обмоток (перепад температуры τ_{II}), получаем следующие зависимости. Для горизонтальных поверхностей:

$$\tau_{II} = 0,055 \cdot q^{0,8}, \quad (152)$$

для вертикальных поверхностей:

$$\tau_{II} = 0,045 \cdot q^{0,8}, \quad (153)$$

где q выражается в ваттах на квадратный метр. На рис. 150 приведены эти зависимости, которые, согласно вышеизложенному, соответствуют работе трансформатора с естественным масляным охлаждением при окружающей температуре $+20^\circ \text{C}$.

По некоторым опытам ВЭИ показатель степени формул (152) и (153) гораздо ближе к 0,5, чем к 0,8, но зато коэффициент имеет большее значение, и для нормальных перепадов τ_{II} кривые проходят близко к кривым рис. 150.

Нужно признать, что такие простые формулы как (152) и (153) не могут точно учесть сложные явления конвекции, происходящие, например, в горизонтальных каналах и т. п. При точных расчетах необходимо вводить поправки (§ 87).

В заключение нужно отметить еще принципиальную разницу в тепловых расчетах при охлаждении маслом и воздухом.

При масляном охлаждении все незакрытые поверхности охлаждения отдают тепло лишь конвекцией, но могут считаться одинаково активными независимо от того, находятся ли они на наружной поверхности обмотки или сердечника, или же выходят в каналы (предполагается, что последние имеют достаточную ширину, см. § 85); при расчетах можно пользоваться кривыми рис. 150. При воздушном же охлаждении следует различать наружные поверхности (обмоток, сердечника, бака), отдающие тепло конвекцией и излучением, и внутренние поверхности (стенки каналов), охлаждающиеся только путем конвекции; в первом случае для расчетов следует пользоваться кривой с рис. 146 во втором — кривой b .

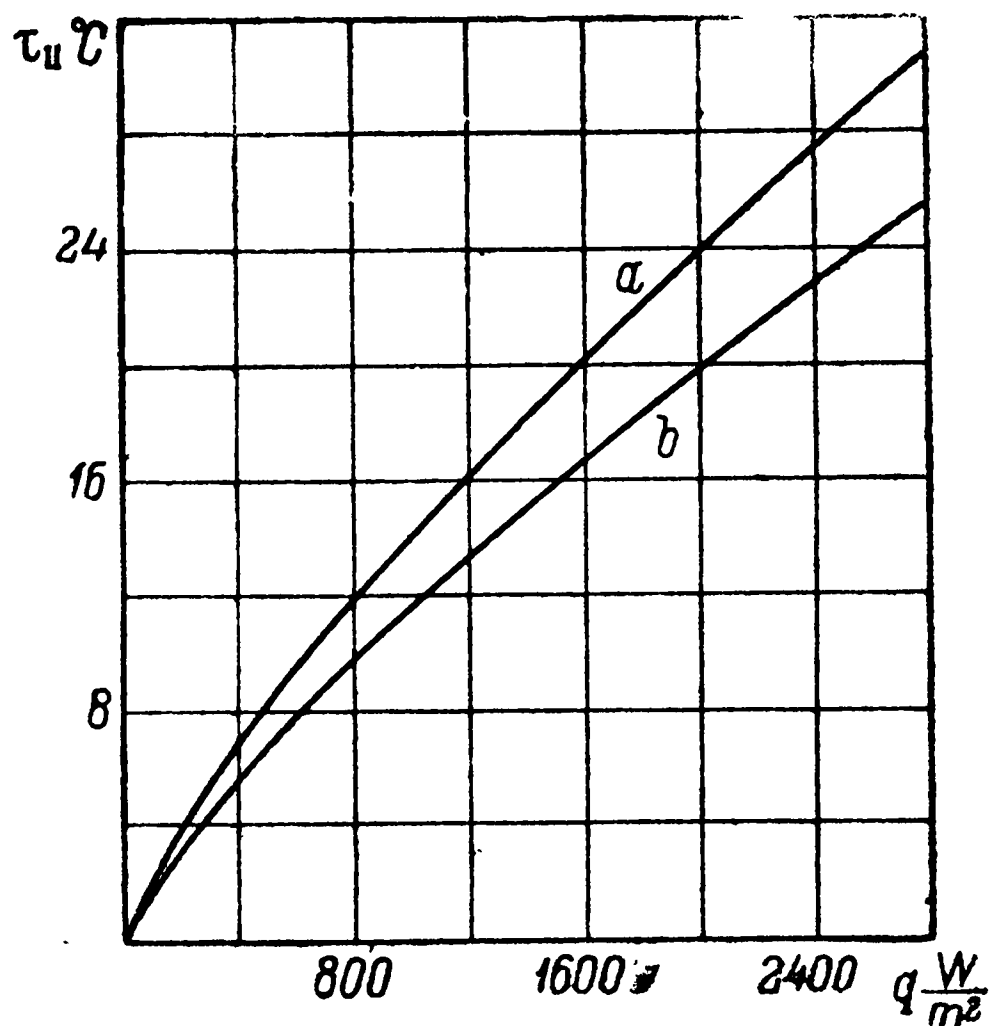


Рис. 150. Теплоотдача в масле: кривая a — для горизонтальной поверхности; кривая b — для вертикальной.

§ 83. Естественная и принудительная циркуляция охлаждающей среды

Данные § 82 (формулы 144, 150 и 151) относятся к естественной (тепловой) циркуляции охлаждающей среды (воздуха или масла). Скорости циркуляции при этом невелики; кривая рис. 151 [Л. 165, стр. 37] дает скорость воздуха, проходящего между волнами бака, в зависимости от высоты последнего. Для масла М. Видмар приводит формулу [Л. 4, стр. 312]:

$$q = \tau_m \sqrt{\frac{\gamma_{mc} \cdot c_{mc} \cdot \lambda_{mc}}{2} \cdot \frac{v_{mc}}{H_k}}. \quad (154)$$

Здесь v_{mc} — средняя скорость циркуляции масла, а $H_k \approx 1,5 \text{ dm}$ (§ 82); все прочие величины известны и отнесены к дециметрам и килограммам.

Порядок величины v_{mc} можно определить, пользуясь, например, кривой a рис. 150; для среднего значения $\tau = 19^\circ \text{C}$:

$$q = 1500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 15 \frac{\text{W}}{\text{dm}^2}.$$

При этом $\tau_m \approx 1,2 \cdot \tau = 1,2 \cdot 19 = 22,8^\circ \text{C}$.

Подставляя в формулу (154) это значение, имеем:

$$15 = 22,8 \sqrt{\frac{0,89 \cdot 1800 \cdot 0,02}{2} \cdot \frac{v_{mc}}{1,5}} = 74 \sqrt{v_{mc}},$$

откуда $v_{mc} = 0,04 \frac{\text{dm}}{\text{s}} = 4 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$.

Таким образом, скорости естественной (тепловой) циркуляции масла выражаются в немногих миллиметрах в секунду.

Повысив скорость v_{mc} , например в 3 раза, можно увеличить теплоотдачу (а значит и потери) в $\sqrt[3]{3}$ раз, что соответствует увеличению нагрузки трансформатора в $\sqrt[4]{3}$ раз, или примерно на 30%. Этого можно легко достигнуть, прогоняя центробежным насосом масло через трансформатор и специальный охладитель (§ 104).

Точно также при помощи искусственного обдувания воздухом охлаждающей поверхности бака можно увеличить общую теплоотдачу в 1,5 ÷ 2,0 раза без чрезмерной затраты мощности на это обдувание и тем повысить мощность трансформатора (§ 102).

§ 84. Удельная тепловая нагрузка поверхности охлаждения

Для правильного расчета величины q (определение см. § 82) необходимо уметь точно определять активную поверхность O

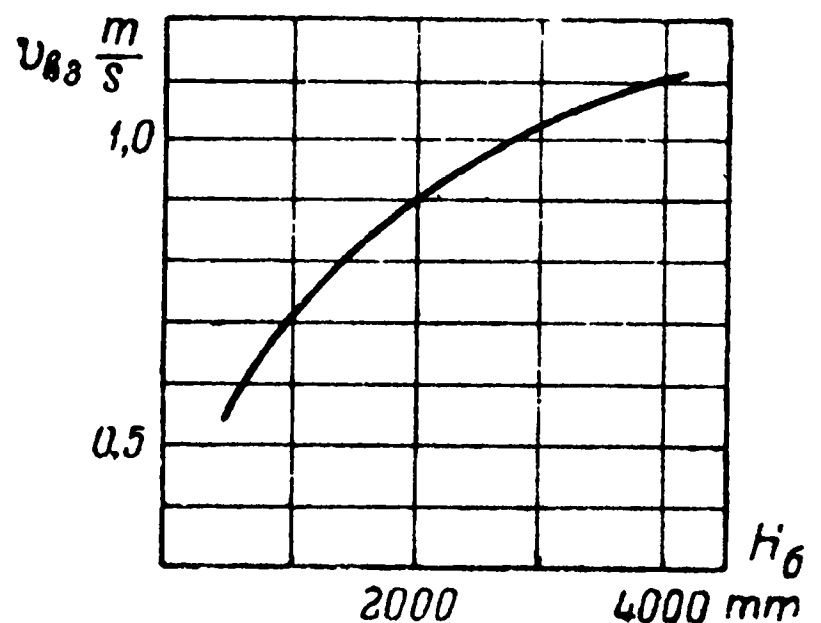


Рис. 151. Скорость воздуха между волнами бака в зависимости от высоты бака.

охлаждения, учитывая коэффициентом $k_s = 0,7 \div 0,8$ степень закрытия последней рейками, прокладками и т. д. Коэффициент этот может быть определен по эскизам обмоток и сердечника.

При выборе допустимого значения q надо учитывать все факторы, влияющие на нагревание и теплоотдачу, например: относительная активность поверхностей, отдающих тепло (§ 82, конец), возможный внутренний перепад температуры (§ 89) в многослойных катушках, для которых величину q приходится снижать и т. д.

Допускаемые значения q берутся из табл. 38 (значение q_δ для баков см. § 97—102).

Т а б л и ц а 38

Части трансформаторов	q в ваттах на кв. метр			
	Воздушное охлаждение		Масляное охлаждение	
	через конвекцию	через конвекцию и излучение	тепловая циркуляция масла	принудительная циркуляция масла
Катушки: многослойные однослойные .	до 200 " 250	до 400 " 600	1000 ÷ 1200 1400 ÷ 1600	— 2000 ÷ 2500
Сердечник . .	" 400	" 700	до 3000	до 4000

Определяя поверхность охлаждения обмотки, работающей с частично выключенными витками, надо учитывать при этом уменьшение активной поверхности охлаждения.

Существует очень простое, но важное для приближенных расчетов, соотношение между величинами q , Δ и допустимой, с точки зрения нагревания, толщиной дисковых или цилиндрических катушек.

Для определенности пусть рис. 123а представляет разрез дисковых катушек с двумя поверхностями охлаждения (учитываются лишь торцевые). Пусть еще коэффициентом k_u учитывается наличие изоляции толщиной δ_u (на обе стороны) прямоугольного сечения провода с размерами α и β , причем:

$$k_u = \frac{\alpha}{\alpha + \delta_u}. \quad (155)$$

Тогда потери P'_m в одной катушке, пренебрегая добавочными, составят (см. формулу 113):

$$\begin{aligned} P'_m &= 2,4 \cdot \Delta^2 \cdot G'_m = 2,4 \cdot \Delta^2 \cdot l_w \cdot S_m \cdot n_a \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = \\ &= 2,4 \cdot \Delta^2 \cdot l_w \cdot \alpha \cdot \beta \cdot n_a \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ W.} \end{aligned}$$

Здесь G'_m — вес меди в килограммах, l_w — средняя длина витка

в метрах, α и β — в миллиметрах, n_a — число витков в катушке в радиальном направлении.

Поверхность O'_m охлаждения катушки по рис. 123a будет равна:

$$O'_m = 2 \cdot l_w \cdot a_1 \cdot k_s \cdot 10^{-3} = 2 \cdot l_w \cdot \frac{n \cdot \alpha}{k_u} \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Если принять $k_s \approx k_u$,
тогда:

$$q = \frac{P'_m}{O'_m} =$$

$$= 10,7 \Delta^2 \cdot \beta \frac{W}{\text{м}^2}. \quad (156)$$

Например,
при $\beta = 10 \text{ мм}$
и $\Delta = 3 \text{ А/мм}^2$,
 $q = 970 \text{ Вт/м}^2$.

Для рис. 123b
поверхность охла-
ждения будет вдвое
меньше, и

$$q =$$

$$= 21,4 \cdot \Delta^2 \cdot \beta \frac{W}{\text{м}^2}. \quad (157)$$

При небольшом
размере a_1 следует
учитывать коэффи-
циентом κ охла-
дающее действие
боковых цилиндри-
ческих поверхно-
стей (если они не
закрыты); см. § 87,
п. 3. Принимая в
среднем $\kappa = 0,85$,
вместо формул (156) и (157) получаем следующие.

Для катушек по рис. 123a:

$$q = 0,85 \cdot 10,7 \cdot \Delta^2 \cdot \beta \approx 10 \cdot \Delta^2 \cdot \beta \frac{W}{\text{м}^2}. \quad (158)$$

Для катушек по рис. 123 b:

$$q = 0,85 \cdot 21,4 \cdot \Delta^2 \cdot \beta \approx 20 \cdot \Delta^2 \cdot \beta \frac{W}{\text{м}^2}. \quad (159)$$

Графическое изображение формул (158) и (159) приведено на рис. 152. По этим кривым, задаваясь допустимым значением q ,

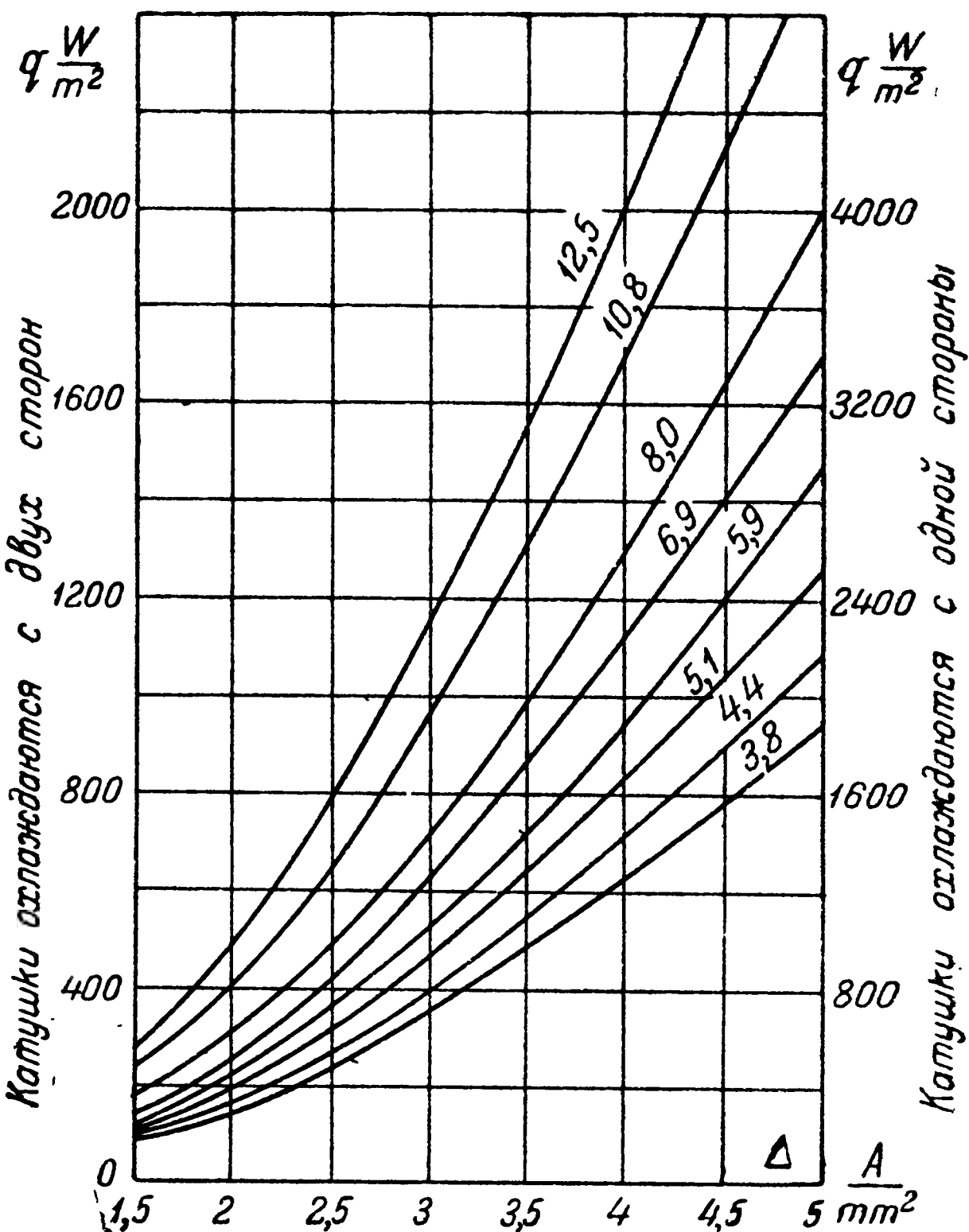


Рис. 152. Кривые для выбора толщины катушек и плотности тока в зависимости от допустимых значений q ; цифры на кривых — толщины катушки в миллиметрах.

можно находить плотность тока Δ при выбранном размере β и наоборот, размер β — при выбранной плотности тока Δ .

Формулы (158) и (159) применимы и для цилиндрических катушек с той разницей, что для последних активными являются боковые поверхности (действием торцевых поверхностей можно пренебречь). Вместо β надо подставить радиальный размер a_2 и пользоваться: формулой (159) при охлаждении катушки с одной стороны, например, если она намотана на толстый цилиндр, и формулой (158), если она охлаждается с двух сторон. При наличии канала δ_1 или δ_2 , т. е. при четырех поверхностях охлаждения цилиндрической катушки (рис. 81 а):

$$q = 5,35 \cdot \Delta^2 \cdot a_2 \frac{W}{m^2}. \quad (160)$$

Если одна из четырех поверхностей закрыта или — у трансформаторов с воздушным охлаждением — обращена к сердечнику, имеющему более высокую температуру, можно считать:

$$q = \frac{10,7 + 5,35}{2} \cdot \Delta^2 \cdot a_2 \approx 8 \cdot \Delta^2 \cdot a_2 \frac{W}{m^2}. \quad (161)$$

В формулах (160) и (161) a_2 , как всегда, есть общий радиальный размер катушки (в миллиметрах), а не размер одного слоя.

§ 85. Охладительные каналы и охлаждательные листы

Для сердечника и для обмоток внутренний перепад температуры τ_I пропорционален квадрату толщины активного материала в направлении течения теплоты (§ 88 и 89), перепад же на поверхности $\tau_{II} \equiv q^{0,8}$ (§ 82). Поэтому при больших потерях и при больших толщинах активного материала могут получиться недопустимые значения q , τ_I и τ_{II} . Приходится увеличивать поверхность охлаждения путем устройства каналов; наиболее активны каналы вертикальные, с интенсивной циркуляцией охлаждающей среды (масло, воздух).

Устраивая, например, надлежащее число каналов в обмотке (рис. 81 и 123), можно получить практически любую поверхность охлаждения, но, конечно, каналы отнимают значительное место в окне.

Согласно теории поверхностного слоя (§ 82) каналы должны иметь минимальную ширину: для воздуха 15 ÷ 20 мм, для масла 5 ÷ 6 мм. Иногда ширину масляных каналов выбирают из расчета: вертикальные 1 ÷ 2% их высоты L (рис. 81), горизонтальные 10 ÷ 15% их длины a_1 (рис. 123).

Вообще, при устройстве каналов необходимо обеспечить достаточную циркуляцию в них охлаждающей среды. Об изоляционном действии каналов см. § 63.

У сердечников путем устройства канала, перпендикулярного поверхности листов, можно уменьшить вдвое расчетную ширину листов; этим внутренний перепад температуры снижается в 4 раза, (§ 88). Такой канал разделяет сердечник однофазного стержневого трансформатора как бы на две концентрические рамы (см.

чертеж III в приложении), а сердечник броневый — на две симметричные рамы (рис. 43).¹ Охлаждающее действие продольных каналов (вдоль листов) гораздо слабее (§ 86), но устроить такие каналы проще. GECo и MTЗ приваривают точками к листу сердечника (рис. 153) бруски $6\frac{1}{2} \times 6\frac{1}{2}$ мм в косом направлении; в месте прокладки таких листов в сердечнике получаются каналы в $6\frac{1}{2}$ мм. AEG и ASEA, придавая каналам значение изоляции, образуют их из стальных листов толщиной 1,0 мм с продольными деревянными рейками, прикрепленными к листам мелкими шурупами (рис. 154). Число каналов берут: при $d = 350 \div 400$ мм — 1 продольный, при $d = 400 \div 450$ мм — 2 продольных, при $d = 450 \div 600$ мм — 3 ÷ 4 продольных; начиная с $d = 500$ мм добавляют один поперечный канал (охлаждение — масляное).

У трехфазных стержневых сердечников обычно применяют лишь продольные каналы; исключение представляют конструкции SSW из рам (рис. 155), между которыми получаются поперечные каналы. Для охлаждения ярем мощных стержневых трансформаторов

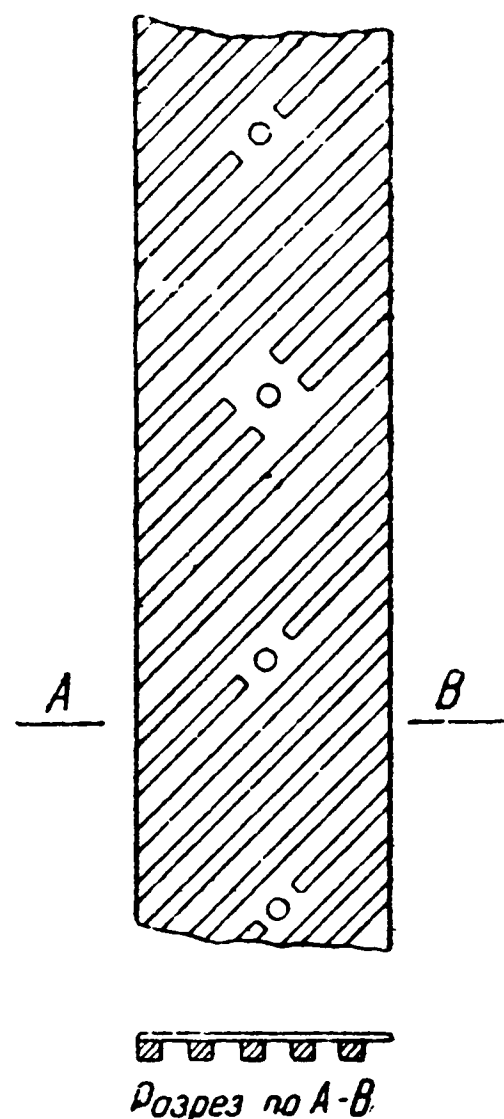


Рис. 153. Устройство продольного канала в стержневых сердечниках по конструкции GECo.

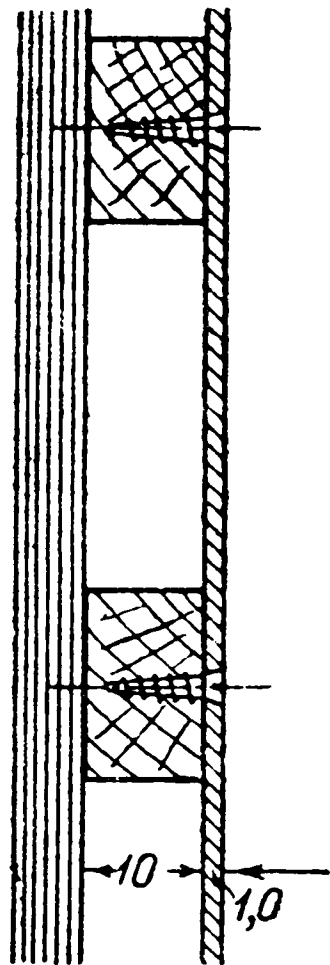


Рис. 154. То же, что на рис. 153, но по конструкции AEG и ASEA.

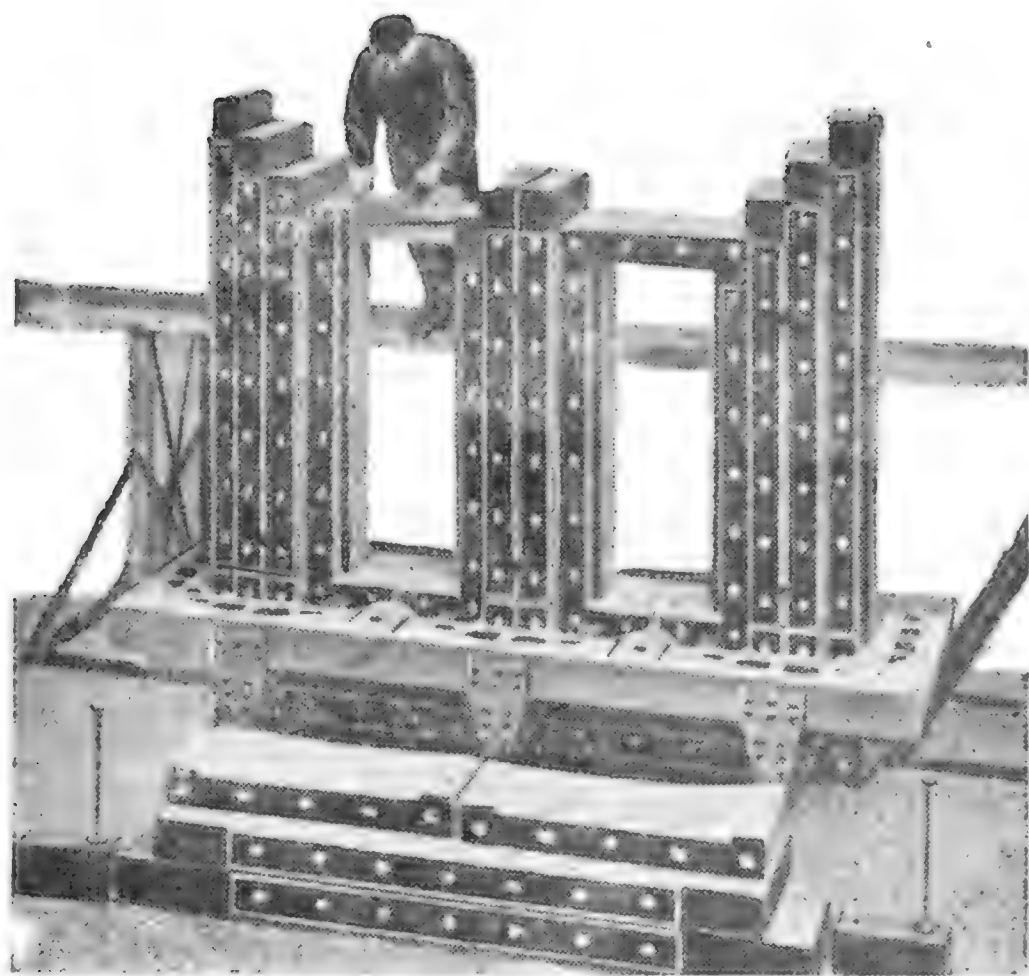


Рис. 155. Конструкция сердечника SSW из рам.

устанавливают часто боковые каналы по рис. 156.

Сердечники броневых трансформаторов, имея сравнительно

¹ Одновременно этим достигается упрощение заготовки листов для сердечника (всего 2 разных детали).

большую и открытую наружную поверхность, охлаждаются лучше сердечников стержневых, однако иногда приходится проштамповывать еще добавочные каналы в листах (рис. 157); при масляном охлаждении это приходится делать, если размер $\frac{b}{2} \geq 140 \text{ mm}$.

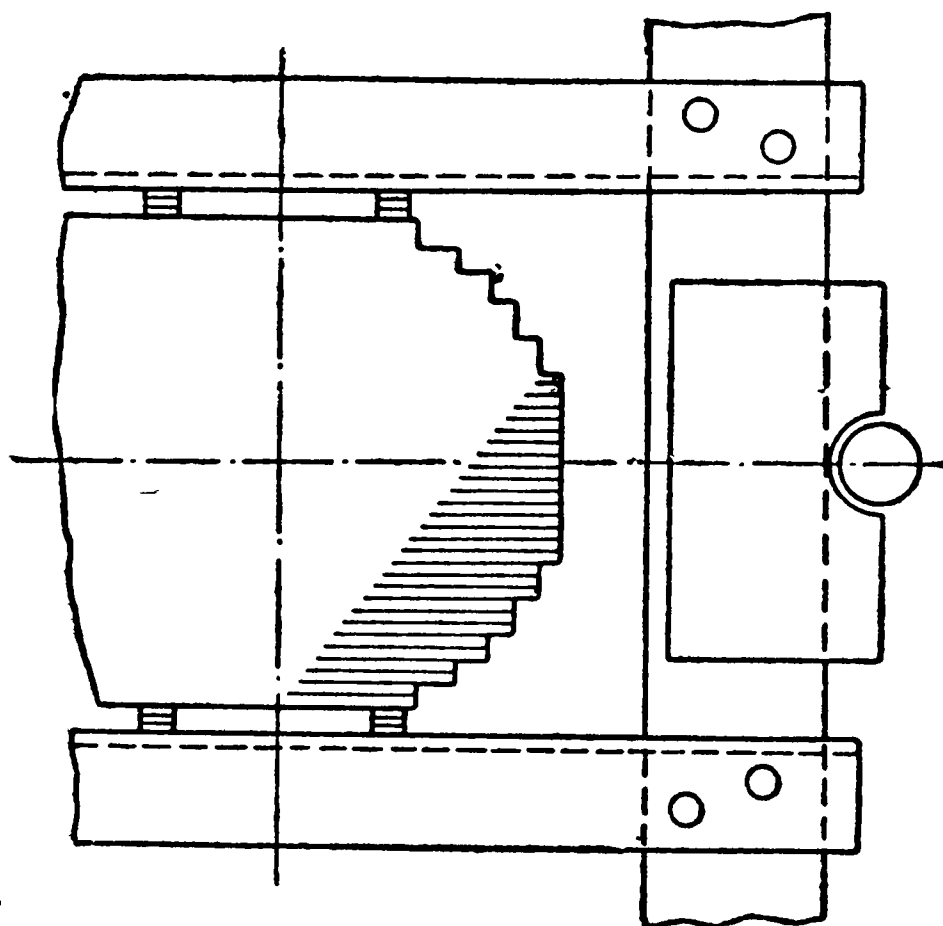


Рис. 156. Устройство боковых каналов для охлаждения яра мощных трансформаторов.

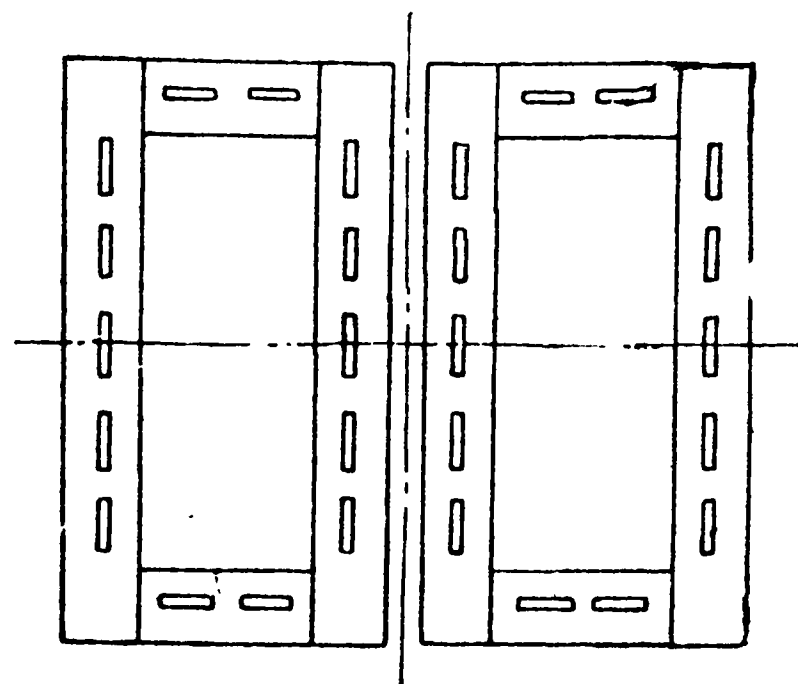


Рис. 157. Устройство каналов в листах большого броневое сердечника.

У трансформаторов с воздушным охлаждением достигают увеличения общей поверхности охлаждения применением медных или цинковых листов — ребер (рис. 158), закладываемых между листами сердечника и между дисковыми катушками — конструкция Пихлера (Pichler); см. [Л. 4, стр. 474].

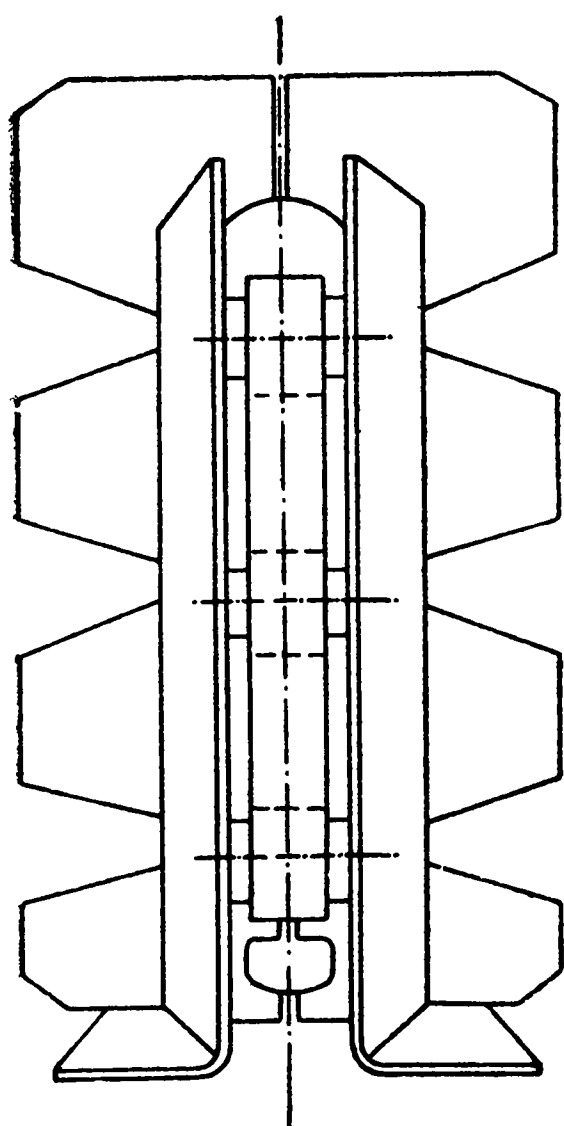


Рис. 158. Применение охлаждающих листов для трансформаторов с воздушным охлаждением.

§ 86. Распространение тепла в сердечнике и перепад температуры на его поверхности

Потери сердечника должны отводиться во вне его активной поверхностью охлаждения. Однако, будучи составлен из листов стали, изолированных бумагой или лаком, он отнюдь не представляет однородного тела; теплопроводность его в направлении, перпендикулярном листам, в воздухе примерно в 50 раз меньше, чем вдоль листов; см. [Л. 21, стр. 102], а также табл. III в приложении.

Это сильно затрудняет подсчет распределения температур в сердечнике, так как неизвестна относительная активность разных частей поверхности охлаждения. В расчете приходится идти сначала на некоторые упрощения, а затем вводить поправки.

Рассмотрим наиболее простой случай, который приводится для указания метода подобных расчетов. Стержень трансформатора (рис. 159) с размерами сечения b и h и с длиной l , достаточно большой по сравнению с b и h , нагревается своими потерями и охлаждается через конвекцию¹ по всей своей поверхности маслом (или воздухом). Требуется найти распределение температур на поверхности стержня, а следовательно и распределение тепловых потоков в нем.

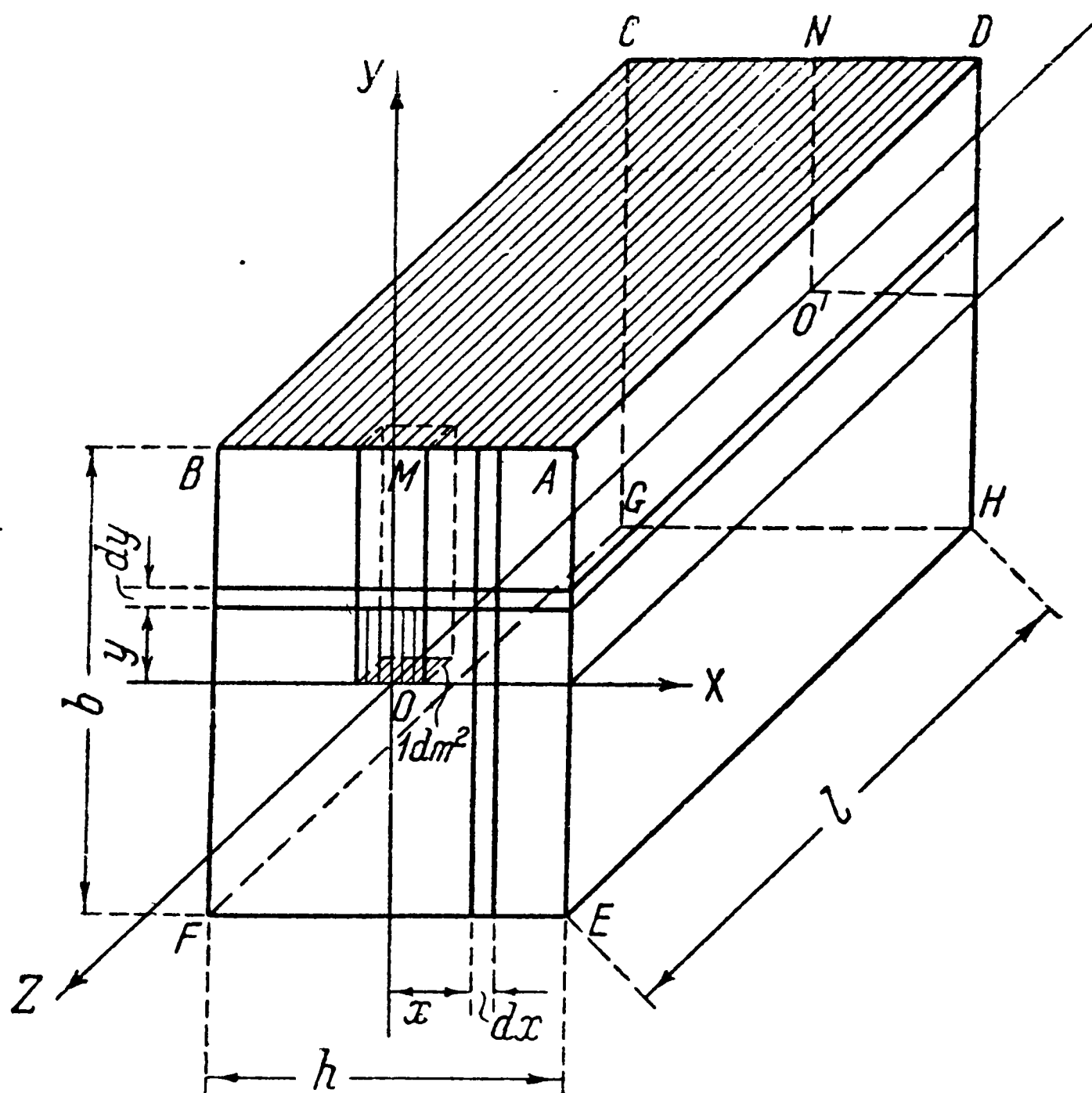


Рис. 159. К расчету распределения потоков тепла в длинном стержне прямоугольного сечения.

Для упрощения расчетов вначале делаются три предположения: 1) вдоль оси OZ стержня тепло не распространяется, 2) каждый лист имеет одинаковую температуру во всех точках, 3) коэффициент конвекции в охлаждающую среду $K_k = \text{const}$.

Очевидно, что все тепло, выделяющееся в стержне, будет выходить из последнего через обе торцевые поверхности $ABCD$ и $EFGH$ и обе боковые $ADHE$ и $BCGF$. Вдоль плоскости $OMNO'$ расположатся точки с наивысшей температурой; по обе стороны от этой плоскости температура будет уменьшаться.

Две плоскости, параллельные плоскости листов и проведенные от начала координат O на расстоянии x и на взаимном рас-

¹ Вокруг стержня обычно имеется охлаждающий канал.

стоянии dx , выделяют элемент объема стержня $dV = b \cdot l \cdot dx$ с весом:

$$\gamma_c \cdot k_c \cdot b \cdot l \cdot dx.$$

В этом объеме в секунду будет выделяться количество тепла:

$$v \cdot \gamma_c \cdot k_c \cdot b \cdot l \cdot dx;$$

v — см. § 68,¹ k_c — см. § 27.

Часть этого тепла будет отдана охлаждающей среде двумя торцевыми поверхностями $2 \cdot l \cdot dx$, а именно количество тепла:

$$2 \cdot K_k \cdot \tau_x \cdot l \cdot dx,$$

где τ_x — превышение температуры элемента объема dV над окружающей температурой, общее для всего элемента. Остальное количество тепла, т. е.

$$dQ_x = v \cdot \gamma_c \cdot k_c \cdot b \cdot l \cdot dx - 2 \cdot K_k \cdot \tau_x \cdot l \cdot dx, \quad (162)$$

будет передано соседнему элементу стержня для передачи далее в направлении оси OX . Полное количество тепла Q_x , проходящее в секунду в этом направлении между сечениями стержня упомянутыми плоскостями, будет составлять по закону теплопроводности (§ 82):

$$Q_x = -\lambda_x \cdot \frac{d\tau_x}{dx} \cdot b \cdot l. \quad (163)$$

Из выражения (162) имеем:

$$\frac{dQ_x}{dx} = l(b \cdot v \cdot \gamma_c \cdot k_c - 2 \cdot K_k \cdot \tau_x).$$

Из выражения (163) имеем:

$$\frac{dQ_x}{dx} = -\lambda_x \cdot b \cdot l \cdot \frac{d^2\tau_x}{dx^2}.$$

Приравнивая между собой эти выражения, получаем:

$$-\lambda_x \cdot b \cdot \frac{d^2\tau_x}{dx^2} + 2K_k \cdot \tau_x = b \cdot v \cdot \gamma_c \cdot k_c.$$

Интеграл этого дифференциального уравнения представляется в виде:

$$\tau_x = \frac{b \cdot v \cdot \gamma_c \cdot k_c}{2 \cdot K_k} \left\{ 1 - C_1 \operatorname{ch} \left[1 - \sqrt{\frac{2 \cdot K_k}{\lambda_x \cdot b}} (x - C_2) \right] \right\}. \quad (164)$$

Для определения постоянных C_1 и C_2 имеются два условия.

1. В середине сердечника превышение температуры будет максимальным; значит при $x = 0$ $\frac{d\tau_x}{dx} = 0$, что дает $C_2 = 0$.

¹ Размерность v должна быть согласована с остальными размерами расчета.

2. На самой поверхности:

$$\left| Q_x \right|_{x=\frac{h}{2}} = \left| -\lambda_x \cdot \frac{d\tau_x}{dx} \cdot b \cdot l \right|_{x=\frac{h}{2}} = \left| K_k \cdot \tau_x \cdot b \cdot l \right|_{x=\frac{h}{2}}$$

или

$$-\lambda_x \left| \frac{d\tau_x}{dx} \right|_{x=\frac{h}{2}} = K_k \left| \tau_x \right|_{x=\frac{h}{2}}.$$

Подставляя сюда значения $\frac{d\tau_x}{dx}$ и τ_x , оба при $x = \frac{h}{2}$, имеем:

$$C_1 = \frac{1}{\sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_x}{K_k \cdot b}} \cdot \operatorname{sh} \left(\sqrt{\frac{2 \cdot K_k}{\lambda_x \cdot b}} \cdot \frac{h}{2} \right) + \operatorname{ch} \left(\sqrt{\frac{2 \cdot K_k}{\lambda_x \cdot b}} \cdot \frac{h}{2} \right)}.$$

Таким образом:

$$\tau_x = \frac{b \cdot v \cdot \gamma_c \cdot k_c}{2 \cdot K_k} \left[1 - C_1 \operatorname{ch} \left(\sqrt{\frac{2 \cdot K_k}{\lambda_x \cdot b}} \cdot x \right) \right]. \quad (165)$$

Давая x разные значения от 0 до $\frac{h}{2}$, можно получить распределение перепадов температуры на поверхностях $ABCD$ и $EFGH$. Наиболее важное значение имеет максимальный перепад температуры τ_m в плоскости $OMNO'$, т. е. при $x = 0$, а именно:

$$\tau_m = \frac{b \cdot v \cdot \gamma_c \cdot k_c}{2 \cdot K_k} (1 - C_1). \quad (166)$$

Если бы теплота отдавалась только поверхностями $ABCD$ и $EFGH$, средний перепад температуры на этих поверхностях составлял бы:

$$\frac{b \cdot v \cdot \gamma_c \cdot k_c}{2 \cdot K_k}.$$

Таким образом выражение, стоящее в фигурных скобках после единицы (формула 164), учитывает влияние боковых поверхностей $ADHE$ и $BCGF$ на общее распределение как тепловых потоков, так и перепадов температуры. Выражение:

$$\frac{b \cdot v \cdot \gamma_c \cdot k_c}{2} = \frac{h \cdot l \cdot b \cdot v \cdot \gamma_c \cdot k_c}{2 \cdot h \cdot l} = q'_c \quad (167)$$

представляет среднюю тепловую загрузку поверхностей охлаждения $ABCD$ и $EFGH$ при условии, что вся теплота будет отдаваться только этими поверхностями.

Уточняя расчет во втором приближении, можно по известной величине q'_c найти соответствующее значение τ по кривой a рис. 146 при воздушном охлаждении или по кривой b рис. 150 при масляном, а потом по этому значению τ определить соответствующее ему значение K_k , которым и пользоваться для расчетов τ_x и τ_m ; обычно достаточно бывает первого приближения ввиду сравнительно небольшой точности всех тепловых расчетов.

Среднее значение перепада на поверхности $ABCD$ будет равно:

$$\begin{aligned} \tau_{II} &= \frac{2}{h} \int_0^{\frac{h}{2}} \tau_x \cdot dx = \\ &= \frac{b \cdot v \cdot \gamma_c \cdot k_c}{2 \cdot K_k} \left(1 - \frac{C_1}{\sqrt{\frac{2 \cdot K_k}{\lambda_x \cdot b} \cdot \frac{h}{2}}} \operatorname{sh} \sqrt{\frac{2 K_k}{\lambda_x \cdot b} \cdot \frac{h}{2}} \right). \end{aligned} \quad (168)$$

Очевидно, что стоящая в скобках величина показывает, какая часть всей теплоты будет отводиться торцевыми поверхностями

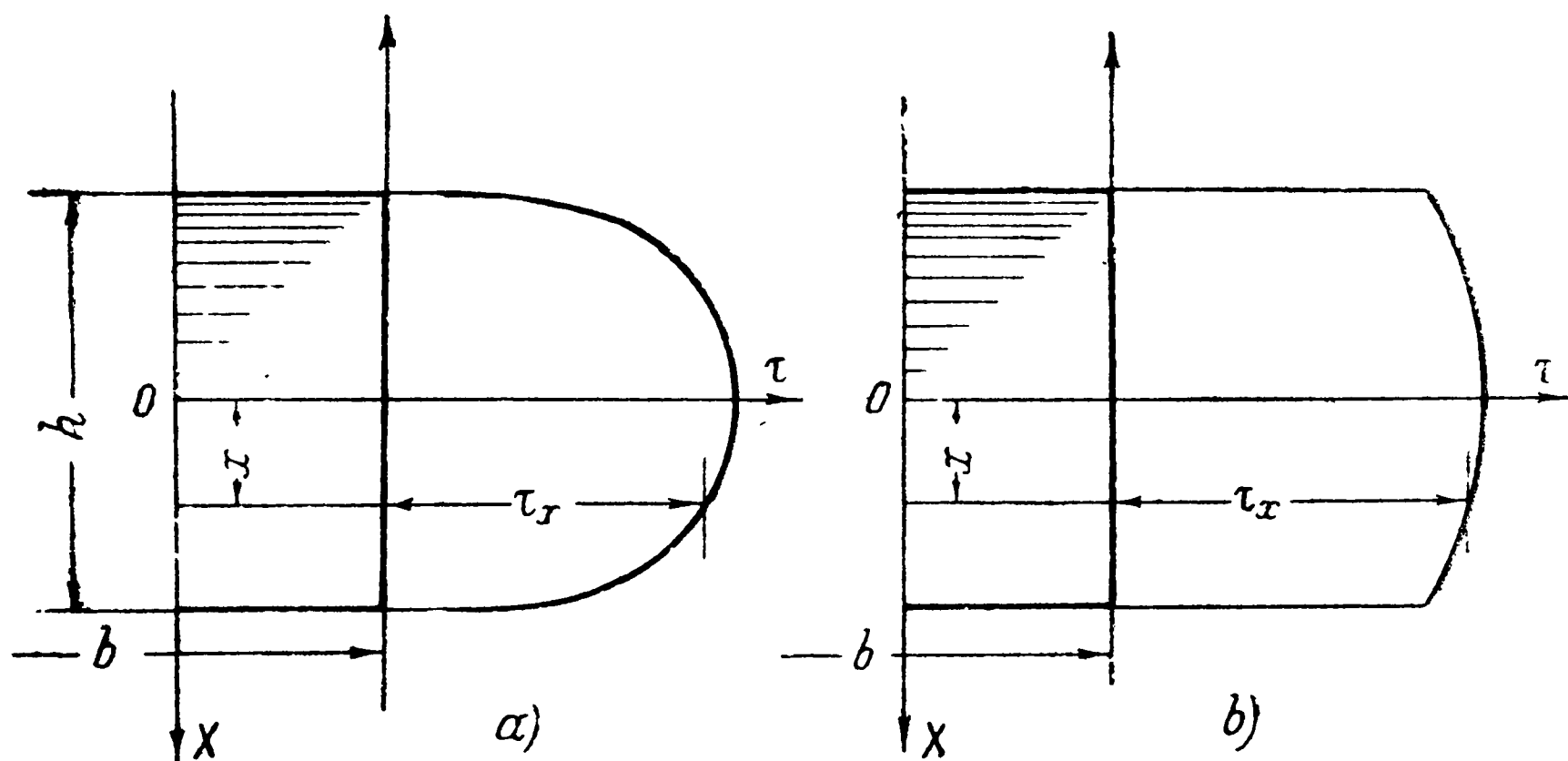


Рис. 160. Распределение перепадов температуры на поверхности длинного стержня прямоугольного сечения: a — при масляном охлаждении; b — при воздушном охлаждении.

$ABCD$ и $EFGH$ стержня; остальная часть будет отводиться боковыми поверхностями $ADHE$ и $BCGF$.

Применяя выведенные выше зависимости к частным случаям, легко прийти к следующим выводам.

1. При масляном охлаждении и при $b = h$ примерная картина распределения перепадов температуры на поверхности стержня изобразится подобно рис. 160а, из которого видно, что около 80% всего количества тепла потерь будет отводиться торцами и лишь около 20% — боковыми поверхностями. Присутствие прессыющих накладок и их изоляции, что не учитывалось вышеизложенным выводом, еще больше повышает количество тепла, отдаваемого торцевыми поверхностями. Поэтому стараются не закрывать торцы рейками, прокладками и т. п. Обмотку расклинивают так, как указано на рис. 161а, применяя круглые клинья, или по рис. 161б, применяя клинья с выемкой.

2. Вследствие малой величины K_k при воздушном охлаждении и при $b = h$ теплота стержня отводится почти равномерно всей его поверхностью (примерно 55% — торцами и 45% — боковыми

поверхностями); рис. 160б дает распределение перепадов температуры для этого случая.

3. При $h \geq 2b$ почти все тепло при масляном охлаждении, и значительная часть его при воздушном, будет отводиться торцевыми поверхностями стержня.

4. При разделении больших сечений стержня на несколько частей каналами (рис. 162), проходящими параллельно листам, соответственно уменьшается h ; одновременно уменьшается и количество тепла, отводимое торцами. Примерное значение последнего в процентах указано на рис. 163 в зависимости от числа каналов в стержне, причем принято, что для стержня без каналов торцами отдается 80% всего тепла (см. выше); охлаждение предполагается масляное.

5. Теплоотдача у многоступенчатых стержней происходит более или менее равномерно по всей поверхности [Л. 2, стр. 182] (предполагая, конечно, что вся поверхность ничем не закрыта).

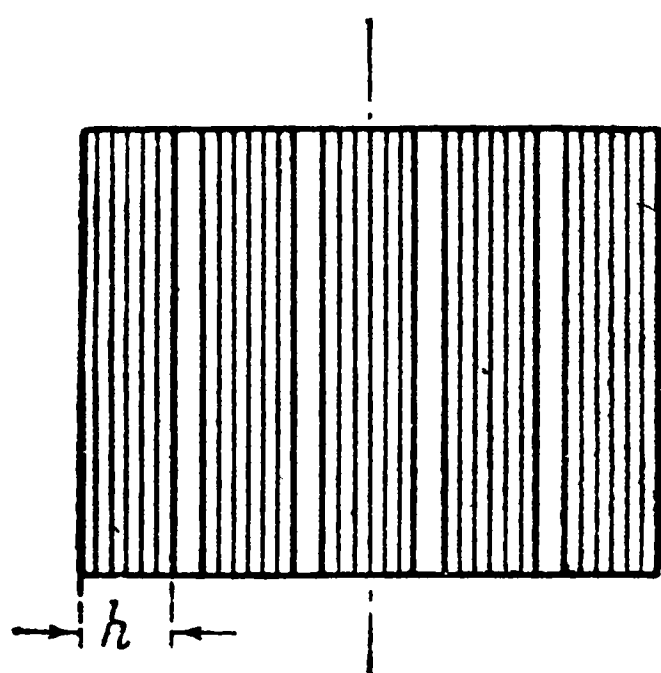


Рис. 162. Охлаждающие каналы в большом прямоугольном сечении стержня или ярма.

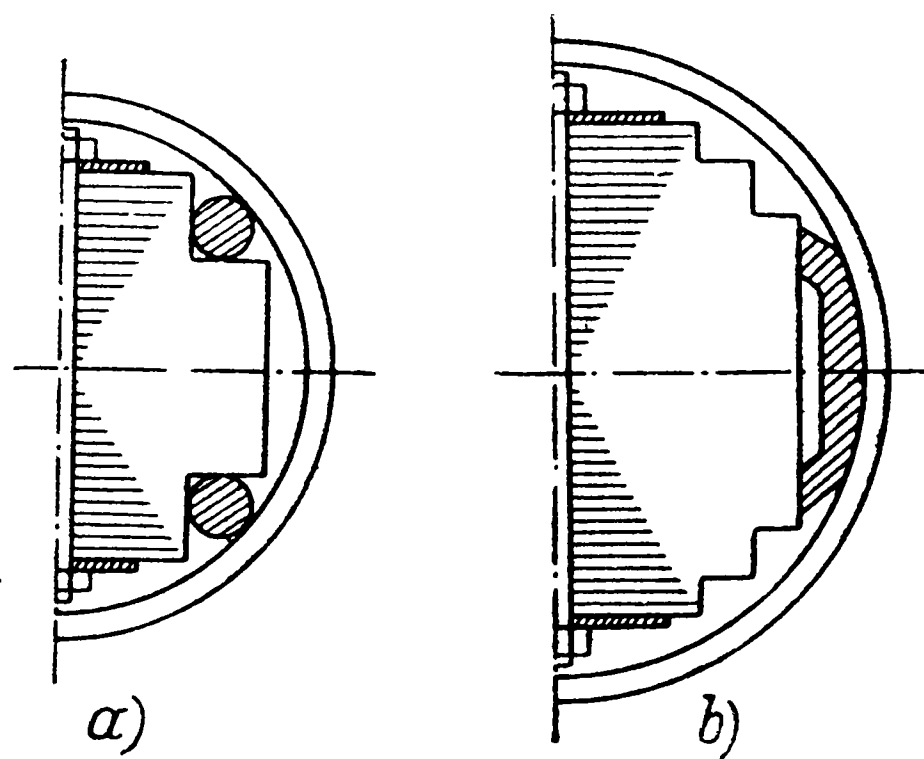


Рис. 161. Расклинивание обмотки с минимальным закрытием активной охлаждающей поверхности стержня.

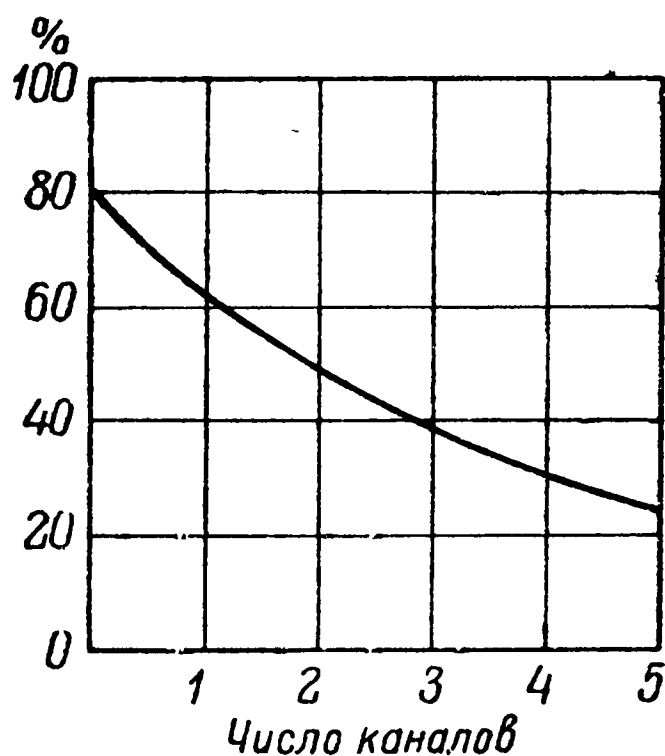


Рис. 163. Примерное количество тепла, отдаваемое торцами при прямоугольном сечении стержней (в процентах от общего количества тепла) в зависимости от числа каналов.

§ 87. Перепад температуры на поверхности обмоток

1. В длинных цилиндрических катушках теплота не распространяется вдоль катушки, а отдается ее поверхностями охлаж-

дающей среде. Если поверхности обращены к каналам, следует учесть коэффициентом $k_s = 0,7 \div 0,8$ частичное закрытие их рейками и т. п. Напротив, наружные поверхности таких катушек можно учитывать полностью. По величине $q_m = \frac{P_m}{O_m}$, где O_m —

поверхность охлаждения в кв. метрах, определяемая по эскизам или чертежам обмоток, можно найти перепад температуры τ_{II} (см. конец § 82 и § 84).

2. Дисковые катушки охлаждаются по преимуществу торцевыми (плоскими) своими поверхностями. При этом расчет можно вести аналогично п. 1 в тех случаях, когда радиальный размер катушек велик по сравнению с осевым, или когда применяется конструкция катушек с подмоткой пресшпановой полосы $1 \div 2$ мм толщины внутри и снаружи (рис. 164), что делается для механической защиты катушек при их пропитке, перевозке и сборке; эти же полосы, закрывающие боковые поверхности, препят-

ствуют отдаче тепла цилиндрическим поверхностям катушек.

3. Для непрерывных (§ 48) и винтовых (§ 49) обмоток боковые (внутренняя и наружная) поверхности остаются открытыми и учитываются при расчете — первая частично, вторая полностью. Точные подсчеты [Л. 21, стр. 134; Л. 166] приводят к формулам, аналогичным формуле, выведенной в § 86 для сердечника; они довольно сложны. Для упрощения можно ввести коэффициент χ , которым учитывается снижение величины q_m от охлаждающего действия открытых боковых поверхностей; χ является функцией от размеров катушки, числа проводов в ней, толщины и теплопроводности изоляции и т. д. В первом приближении, в зависимости от числа n_a проводов в дисковых катушках, величину χ можно брать из кривых рис. 165 для разных отношений β/α размеров сечения провода.

4. При точных расчетах нагрева-

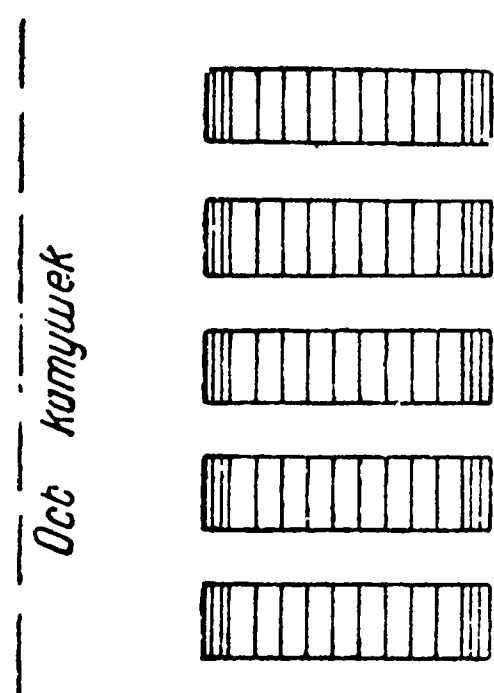


Рис. 164. Конструкция дисковых катушек с подмоткой внутри и снаружи из пресшпановых полосок для защиты от механических повреждений.

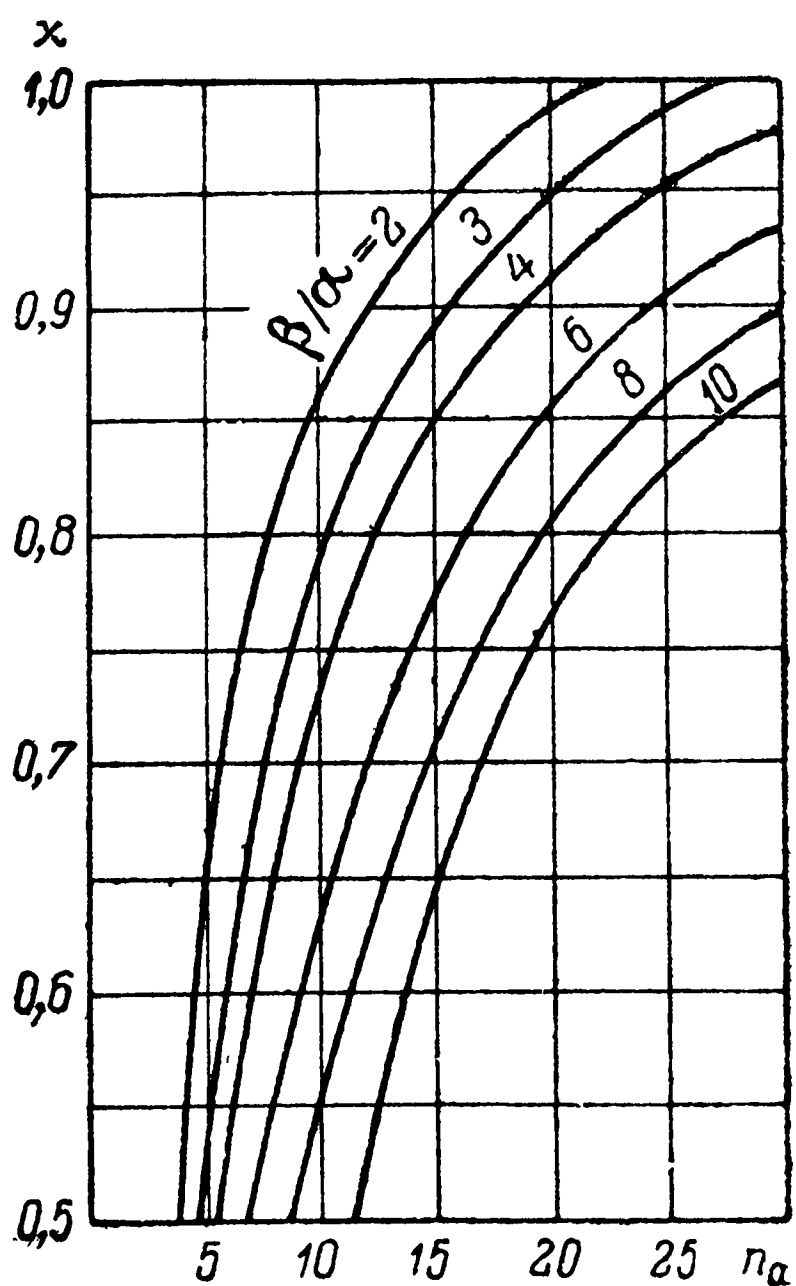


Рис. 165. Охлаждающее действие боковых сторон дисковых катушек в зависимости от числа n_a витков в катушке и отношения сторон β/α сечения витка.

ния горизонтальных дисковых катушек следует учитывать размеры самих каналов между катушками. Некоторыми исследователями замечено [Л. 167 и 168], что с нижней стороны таких катушек при работе трансформатора образуется слой горячего масла, которое само не может подняться и в то же время препятствует циркулирующему маслу омывать нижние поверхности катушек: Рис. 166 дает понятие о сложности циркуляции масла около катушек конструкции GECo [Л. 169]. Нижеследующие формулы, выведенные на основе американских конструкций,¹ позволяют учесть примерную зависимость перепада температуры τ_{II} от относительных размеров каналов.

При $a_1 > 2,0$ см и $\delta_1 > 0,3$ см (рис. 123):

$$\tau_{II} = 10 + \frac{3}{\delta_1} + \frac{a_1}{5,5} \left(\frac{q_m}{1000} \right)^{0,8} \text{ } ^\circ\text{C.} \quad (169)$$

При $a_1 < 2,0$ см и $\delta_1 > 0,3$ см:

$$\tau_{II} = \left(10 + 0,5 \frac{a_1}{\delta_1} \right) \left(\frac{q_m}{1000} \right)^{0,8} \text{ } ^\circ\text{C.} \quad (170)$$

Здесь a_1 и δ_1 — в сантиметрах, а q_m — в ваттах на кв. метр.

5. При многорядных дисковых катушках с каналами по рис. 63 можно считать одинаково активными как торцевые, так и цилиндрические поверхности, так как радиальный размер катушек обычно невелик, и структура их в радиальном и осевом направлении одинакова в противоположность дисковым катушкам из прямоугольного провода. Более детальный расчет нагревания многорядных катушек см. [Л. 166].

§ 88. Внутренний перепад температуры в сердечнике

При анализе нагревания стержня трансформатора (§ 86), для упрощения было сделано предположение о том, что каждый лист имеет одну и ту же температуру во всех точках, чего на самом деле нет; вдоль оси OZ стержня (рис. 159) расположены точки с наивысшей температурой. Разность между этой последней и температурой на поверхности, например в точках M или N , составит внутренний перепад температуры τ_I в стержне. τ_I можно определить следующим образом.

¹ Формулы любезно сообщены автору проф. Г. Н. Петровым.

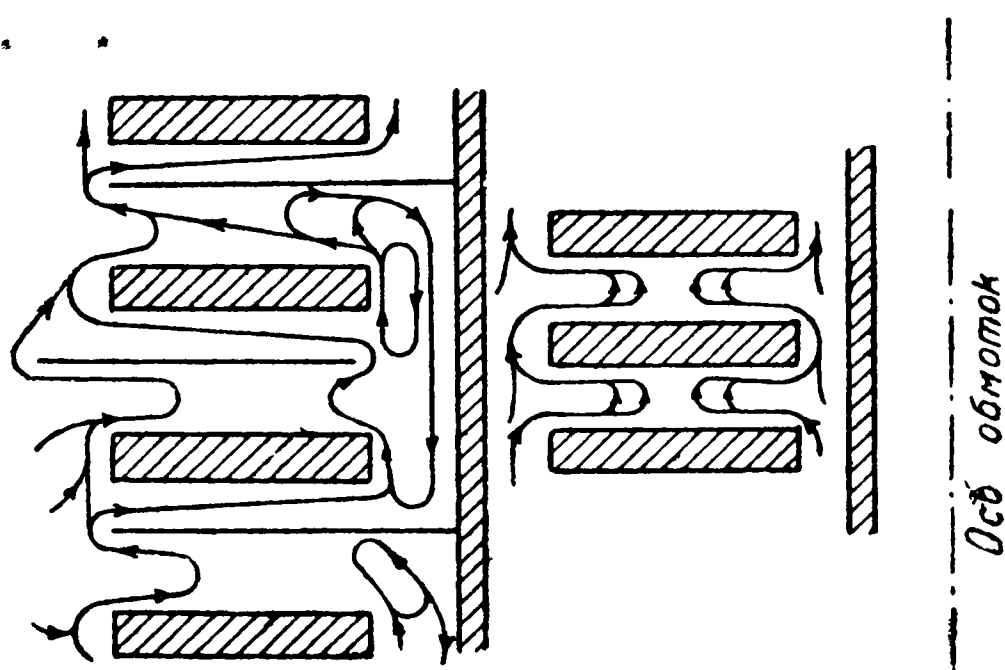


Рис. 166. Циркуляция масла около горизонтальных дисковых катушек.

На расстоянии y от начала координат (рис. 159) проведем параллельно плоскости XOZ две плоскости, пересекающие стержень, с расстоянием dy между ними, и выделим из материала стержня вдоль оси OY столбик с сечением $1 \times 1 \text{ dm}^2$ и высотой $\frac{b}{2} \text{ dm}$.

Количество тепла Q_y , проходящее в секунду в направлении оси OY сквозь пересечение столбика указанными плоскостями, будет по закону теплопроводности (формула 139) равно:

$$Q_y = -1 \cdot 1 \cdot k_c \cdot \lambda_c \cdot \frac{d\vartheta_y}{dy},$$

где $d\vartheta_y$ — разность температур в столбике между обеими проведенными плоскостями.

С другой стороны Q_y есть количество тепла, выделяющегося в секунду в заштрихованной части столбика; оно равно:

$$Q_y = 1 \cdot 1 \cdot y \cdot k_c \cdot \gamma_c \cdot v.$$

Приравнявая оба выражения, получаем:

$$y \cdot \gamma_c \cdot v = -\lambda_c \cdot \frac{d\vartheta_y}{dy}$$

или

$$d\vartheta_y = -\frac{\gamma_c \cdot v}{\lambda_c} \cdot y \cdot dy,$$

откуда

$$\tau_I = \int_{\frac{b}{2}}^0 d\vartheta_y = \int_0^{\frac{b}{2}} \frac{\gamma_c \cdot v}{\lambda_c} y dy =$$

$$= \frac{\gamma_c \cdot v}{\lambda_c} \cdot \frac{b^2}{8} \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (171)$$

Рис. 167. Тепловой поток из стержня в ядро трехфазного трансформатора.

Если стержни трансформатора не могут охлаждаться сами (например, при горизонтальном их положении и покрытии обмоткой, в особенности у трансформаторов с воздушным охлаждением), то теплота потерь в стержнях переходит в ярма, и расчет перепада τ_I усложняется. Пусть рис. 167 относится к этому случаю. Очевидно, что в точке A температура будет наивысшей. Полный внутренний перепад температуры τ_I составит из суммы трех перепадов $\tau' + \tau'' + \tau'''$.

Перепад τ' в стержне между точками A и B равен по предыдущему:

$$\tau' = \frac{\gamma_c \cdot v}{\lambda_c} \cdot \frac{l^2}{8} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для того чтобы теплоту Q , выделяющуюся в половине стержня, вывести на наружную поверхность ярма, необходим еще по закону теплопроводности (§ 82) перепад температуры:

$$\tau'' = \frac{Q \cdot b_{\text{я}}}{\lambda_c \cdot S \cdot \nu} = S \cdot \frac{l}{2} \cdot \gamma_c \cdot \frac{k_c \cdot \nu \cdot b_{\text{я}}}{\lambda_c \cdot S \cdot \nu} = \frac{\gamma_c \cdot k_c \cdot \nu \cdot l \cdot b_{\text{я}}}{2 \cdot \lambda_c \cdot \nu} \text{ } ^\circ\text{C},$$

где коэффициентом $\nu = 1,2 \div 1,4$ учитывается среднее уширение теплового потока в ярме после выхода из основания стержня.

И наконец, для того чтобы провести через ярмо потери самого ярма, причем обычно $B_{\text{я}} < B$ и $\nu_{\text{я}} < \nu$, необходим по формуле (171) перепад:

$$\tau''' = \frac{\gamma_c \cdot \nu_{\text{я}}}{2\lambda_c} b_{\text{я}}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

(интегрирование в данном случае производится от 0 до $b_{\text{я}}$).

Общий внутренний перепад τ_{I} температуры составит:

$$\tau_{\text{I}} = \tau' + \tau'' + \tau''' = \frac{\gamma_c}{2\lambda_c} \left(\frac{\nu \cdot l^2}{4} + \frac{k_c \cdot \nu \cdot b_{\text{я}} \cdot l}{\nu} + \nu_{\text{я}} \cdot b_{\text{я}}^2 \right) \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (172)$$

Все размеры — в дециметрах; к дециметрам отнесено и λ_c .

§ 89. Внутренний перепад температуры в обмотках

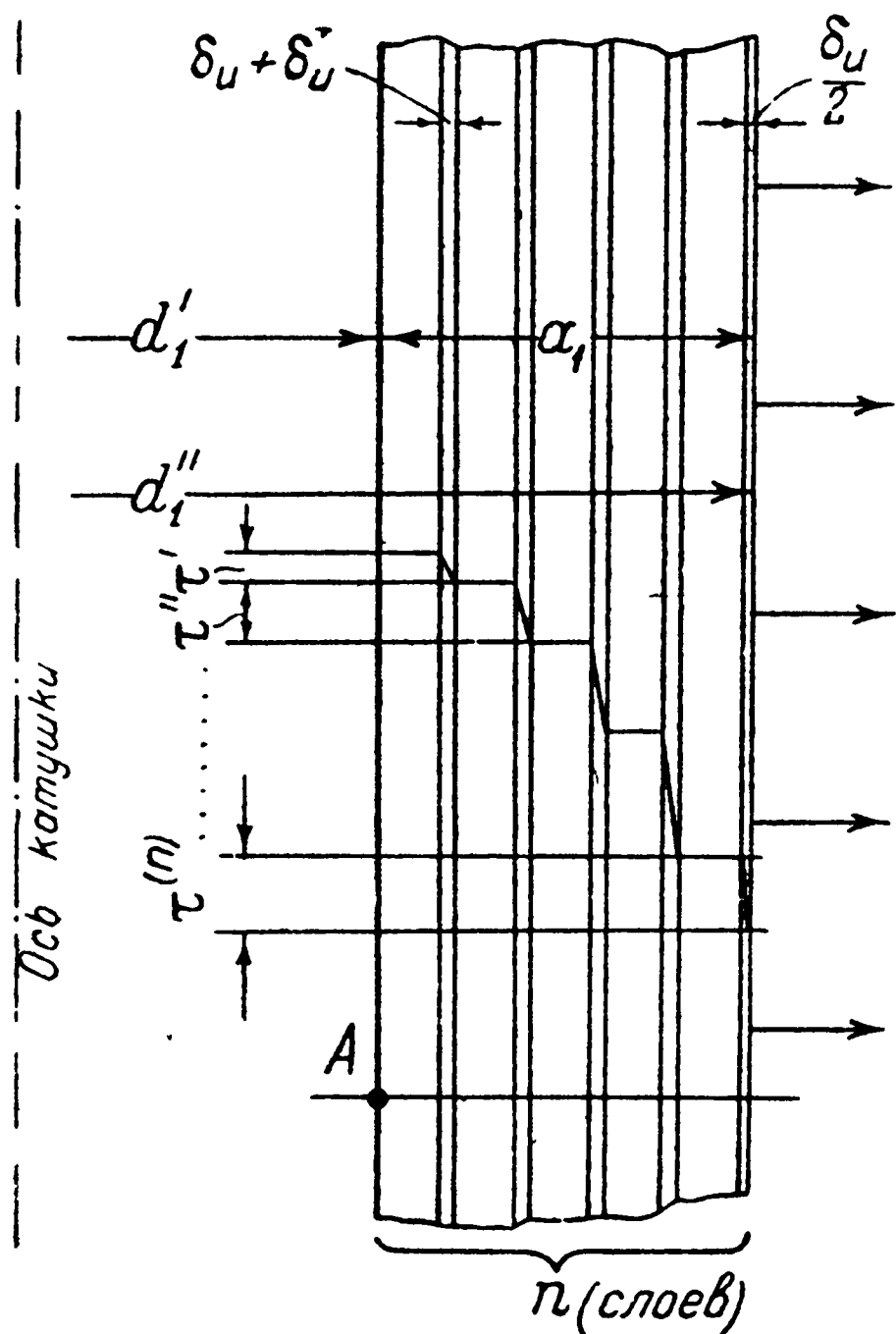
Передача тепла внутри обмотки от самой горячей точки ее до поверхности происходит путем теплопроводности; поэтому, казалось бы, расчет внутреннего перепада температуры τ_{I} в обмотке должен быть вполне подобным расчету § 88 для сердечника. Но обмотка, состоящая из медного провода, его изоляции и — при многослойных катушках — добавочных прокладок между слоями, не составляет однородного тела ни в одном из направлений, в то время как в сердечнике однородность все же имеет место хоть в одном направлении — вдоль листов.

Общий метод расчета внутренних перепадов температуры в обмотке заключается в том, что действительную обмотку заменяют для расчетов таким фиктивным однородным телом, которое при тех же геометрических размерах и тех же потерях имело бы ту же среднюю теплопроводность, что и данная обмотка. При этом для многослойных катушек анализ показывает, что, как и следовало ожидать, характер распределения температур внутри обмотки оказывается таким же как и для сердечника, т. е. внутренний перепад температуры пропорционален квадрату толщины катушки, или, соответственно, квадрату числа слоев намотки. Рассмотрим следующие случаи расчета.

1. Внутренний перепад температуры в длинных многослойных цилиндрических катушках можно подсчитать следующим образом.

Пусть длина катушки l_1 достаточно велика по сравнению с ее диаметрами d_1' и d_1'' (рис. 168), а последние, в свою очередь, велики по сравнению с радиальным размером катушки a_1 .

Точка A принадлежит наиболее нагретому слою обмотки, от которого до наружной поверхности помещается n слоев намотки; передача тепла происходит в направлении стрелок параллельными струями. На наружную поверхность катушки теплота выходит в количестве q W/cm^2 и отдается дальше охлаждающей среде; при этом предполагается, что вдоль катушки тепло не распространяется. Выделим из катушки струю теплового потока сечением $1 \times 1 \text{ cm}^2$.



Теплопроводность меди по сравнению с теплопроводностью изоляции можно считать бесконечно большой, а составляющие перепады температур $\tau' \dots \tau^{(n)}$ можно считать происходящими лишь в слоях изоляции, от первого до n -го (наружного). Воспользуемся в данном случае понятием о термическом сопротивлении (§ 82) в термических омах, считая, что сечение теплового потока равно 1 cm^2 . Тогда по закону теплопроводности:

$$\begin{aligned}\tau' &= \frac{q}{n} R, \\ \tau'' &= \frac{2q}{n} R \dots \text{и т. д.}, \\ \tau^{(n-1)} &= \frac{n-1}{n} \cdot q \cdot R, \\ \tau^{(n)} &= \frac{n}{n} \cdot q \cdot R' = q \cdot R' .\end{aligned}$$

Рис. 168. Перепад температуры внутри многослойной обмотки.

Здесь R — термическое сопротивление изоляции между двумя слоями намотки (изоляция провода δ_u , считая на обе стороны, и прокладка δ_u' между слоями); R' — то же для наружного слоя (изоляция провода на одну сторону $\frac{\delta_u}{2}$ и, иногда, добавочная изоляция δ_u'' всей катушки — лентой, бумагой или кембриком).

От внутреннего слоя (точка A) до наружной поверхности перепад температуры будет наибольшим и составит:

$$\begin{aligned}\tau_{\text{Im}} &= \tau' + \tau'' + \dots + \tau^{(n-1)} + \tau^{(n)} = \frac{q}{n} \left\{ R \cdot [1 + 2 + \dots + (n-1)] + \right. \\ &\quad \left. + n \cdot R' \right\} = \frac{q}{n} \left[R \cdot \frac{1 + (n-1)}{2} (n-1) + n \cdot R' \right] = \\ &= q \left[\frac{R}{2} \cdot (n-1) + R' \right] ^\circ\text{C} .\end{aligned}\tag{173}$$

Перепад температуры от второго слоя до поверхности катушки будет составлять:

$$\frac{q}{n} \left\{ R \cdot [2 + \dots + (n-1)] + nR' \right\} \dots \text{и т. д.}$$

Для $(n-1)$ -го слоя:

$$\frac{q}{n} [R \cdot (n-1) + n \cdot R'],$$

для n -го слоя:

$$\frac{q}{n} \cdot n \cdot R' = q \cdot R'.$$

Очевидно, что среднее для всей обмотки значение внутреннего перепада температуры будет равно:

$$\begin{aligned} \tau_I &= \frac{q}{n \cdot n} \left\{ R \cdot [1 + 2^2 + 3^2 + \dots + (n-1)^2] + n^2 \cdot R' \right\} = \\ &= q \left[\frac{R \cdot (n-1) \cdot (2n-1)}{6n} + R' \right]. \end{aligned} \quad (174)$$

Отношение

$$\frac{\tau_I}{\tau_{Im}} = \frac{\frac{R \cdot (n-1) \cdot (2n-1)}{6n} + R'}{\frac{R(n-1)}{2} + R'}. \quad (175)$$

При $R' = R$

$$\frac{\tau_I}{\tau_{Im}} = \frac{(n-1) \cdot (2n-1) + 6n}{3n \cdot (n+1)}.$$

Если $n = 5$,

$$\frac{\tau_I}{\tau_{Im}} = \frac{4 \cdot 9 + 30}{3 \cdot 5 \cdot 6} = 0,73,$$

если $n = 10$,

$$\frac{\tau_I}{\tau_{Im}} = \frac{9 \cdot 19 + 60}{3 \cdot 10 \cdot 11} = 0,7,$$

если $n = 20$,

$$\frac{\tau_I}{\tau_{Im}} = \frac{19 \cdot 39 + 120}{3 \cdot 20 \cdot 21} = 0,685.$$

При большом n отношение $\frac{\tau_I}{\tau_{Im}}$ стремится к $2/3$; эта величина обычно и принимается в расчетах. Однако это неточно, как показано выше; вообще говоря, это отношение может колебаться в пределах $0,5 \div 1,0$ [Л. 166, стр. 33].

При прямоугольном проводе определение R и R' (формула 174) не представляет трудности (§ 82, п. 1, сноска), да и катушки имеют обычно лишь $1 \div 3$ слоя. Труднее определить R и R' для многорядных катушек из круглого провода. В этом случае можно считать:

$$R = \frac{\delta_u + \delta'_u}{\lambda} \text{ и } R' = \frac{\frac{\delta_u}{2} + \delta''_u}{\lambda},$$

если теплопроводности слоев δ_u , δ'_u и δ''_u считать одинаковыми.

Здесь λ есть результирующая теплопроводность изоляционных промежутков между проводами, которая зависит от расположения проводов в многорядной катушке. Нетрудно показать [Л. 166], что при квадратном расположении проводов (рис. 62):

$$\frac{\lambda_u}{\lambda} \approx 0,7 \left(\frac{\delta_u}{\alpha} \right)^{0,55},$$

а при треугольном (рис. 65):

$$\frac{\lambda_u}{\lambda} \approx 0,6 \left(\frac{\delta_u}{\alpha} \right)^{0,66},$$

где $\lambda_u = 0,002 \div 0,0025 \frac{\text{W}}{\text{см} \cdot ^\circ\text{C}}$ — теплопроводность пропитанной изоляции слоев δ_u , δ'_u и δ''_u , а α , как всегда, диаметр провода.

Чаще применяется второе расположение, так как для осуществления первого нужны совершенно жесткие (а значит и толстые) прокладки между слоями.

Зная λ_u , δ_u , δ'_u , δ''_u и α , можно найти λ , R , R' , а затем τ_{Im} и τ_I по формулам (173) и (174).

Для случая $\delta'' = 0$ М. Видмар (Л. 4, стр. 286] предлагает упрощенную формулу, дающую впрочем удовлетворительные результаты (с превышением в $10 \div 15\%$), а именно при квадратном расположении проводов (рис. 62) для пропитанной катушки:

$$\tau_{\text{Im}} = 8,5 \cdot \Delta^2 \cdot \alpha \cdot \frac{\delta_u + \delta'_u}{2} \left(\frac{n}{10} \right)^2 ^\circ\text{C}; \quad (176)$$

для непропитанной — вдвое больше.

2. Внутренний перепад температуры в простых цилиндрических катушках, в однорядных дисковых и др., с одной или двумя поверхностями охлаждения, сводится к перепаду в наружном слое $\frac{\delta_u}{2}$ изоляции (при отсутствии слоя δ''), причем:

$$\tau_I = \tau_{\text{Im}} = q \cdot \frac{\delta_u}{2 \cdot \lambda_u} ^\circ\text{C}. \quad (177)$$

При наличии добавочного слоя δ''_u следует к перепаду, рассчитанному по формулам (176) или (177), добавить перепад температуры в слое δ''_u , равный:

$$q \cdot \frac{\delta''_u}{\lambda_u} ^\circ\text{C}.$$

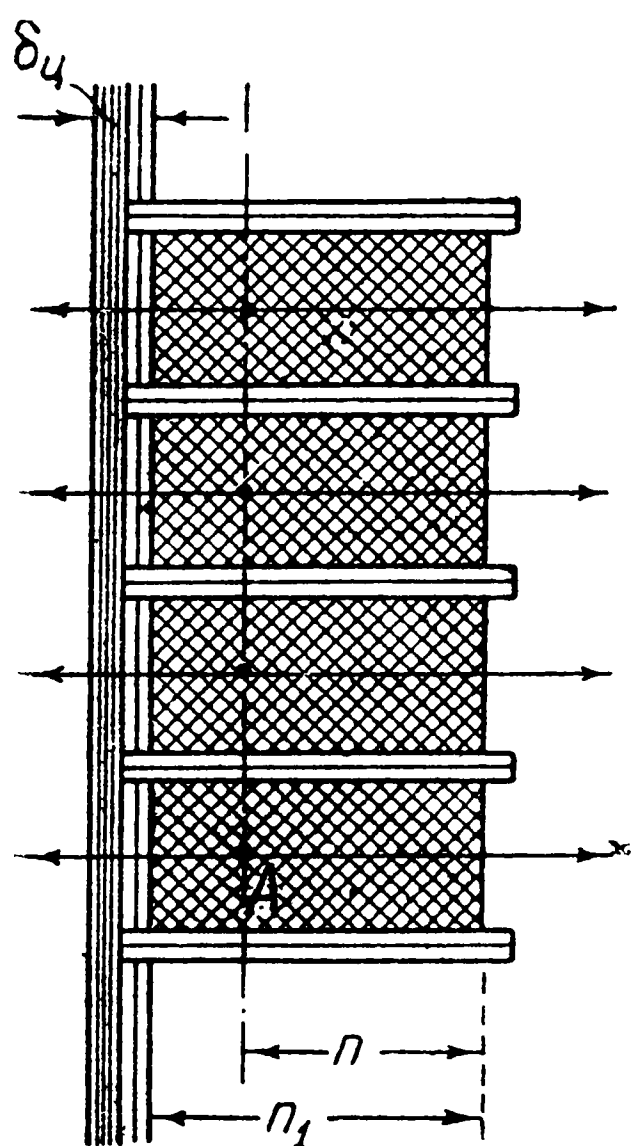


Рис. 169. Охлаждение многослойной обмотки при наличии внутреннего цилиндра; n и n_1 — число слоев.

3. Если многорядная дисковая катушка из n_1 слоев круглого провода охлаждается со всех сторон, то наиболее горячая точка A в ней будет, конечно, лежать в центре сечения катушки, и число n , входящее в формулы 173 — 176, будет равно половине числа слоев: $n = \frac{n_1}{2}$.

Но если такая катушка намотана на изолирующий цилиндр толщиной δ_u (рис. 169), как это бывает у высоковольтных обмоток трансформаторов до 150 kVA, то часть тепла будет отводиться и сквозь цилиндр (предполагая, что по другую сторону цилиндра имеется охлаждающий канал). Если считать теплопроводность всей пропитанной изоляции и цилиндра одинаковой, то точка A с наивысшей температурой будет лежать в том n -ом слое (считая снаружи), для которого будет соблюдено равенство:

$$\delta_u + (n_1 - n) \cdot (\delta_u + \delta'_u) + \frac{\delta_u}{2} = (n - 1) \cdot (\delta_u + \delta'_u) + \frac{\delta_u}{2}.$$

Отсюда получается:

$$n = \frac{\delta_u + (n_1 + 1) \cdot (\delta_u + \delta'_u)}{2(\delta_u + \delta'_u)}.$$

При $\delta_u = 2$ mm, $\delta_u = 0,3$ mm, $\delta'_u = 0,1$ mm и $n_1 = 10$ (слоев):

$$n = \frac{2 + 0,4 \cdot 11}{2 \cdot 0,4} = 8,$$

т. е. наиболее нагрет будет восьмой слой, считая снаружи.

§ 90. Перепад температуры от масла к стенке охладителя

Этот перепад τ_{III} обычно очень невелик, и отдельный подсчет его производится лишь при естественной (тепловой) циркуляции масла. Для расчета можно пользоваться формулой (153) для вертикальных поверхностей в виде:

$$\tau_{III} = 0,045 \cdot q_{\delta}^{0,8} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (178)$$

(см. кривую b рис. 150); q_{δ} W/m² — тепловая нагрузка стенок бака или иного охладителя с тепловой циркуляцией масла.

Можно отметить, что поскольку q_{δ} гораздо меньше q_m и q_c , величина τ_{III} много меньше τ_{II} ; например, при $q_{\delta} = 250$ W/m² получается $\tau_{III} = 3,75^\circ\text{C}$.

§ 91. Перепад температуры от стенки охладителя к окружающему воздуху

Этим перепадом (τ_{IV}) заканчивается процесс охлаждения трансформатора окружающим воздухом; перепадом в самой стенке бака пренебрегают.

При расчете величины τ_{IV} не следует забывать, что только гладкие (плоские или цилиндрические) стенки отдают тепло

одновременно и конвекцией и излучением, остальные же поверхности (волны и трубы баков) имеют только теплоотдачу через конвекцию (§ 82). В первом случае при расчетах пользуются кривой c рис. 146, во втором — кривой b этого рисунка, понимая под τ_{IV} средний перепад для всей поверхности охлаждения. Подробно о расчете τ_{IV} и самих баков см. § 98—102 и 104.

§ 92. Кривые нагревания и охлаждения

Согласно теории нагревания, трансформатор, работающий со своей номинальной мощностью, будет нагреваться по закону:

$$\tau = \tau_m - T \frac{d\tau}{dt}. \quad (179)$$

Здесь τ — превышение температуры трансформатора над начальной температурой по прошествии времени t от начала нагревания, τ_m — максимальное превышение температуры, которое будет достигнуто теоретически через бесконечно большой промежуток времени, T — постоянная нагревания, обычно выражаемая в часах и представляющая то время, в течение которого превышение температуры трансформатора достигло бы величины τ_m , если бы он вовсе не охлаждался (подробно о величине T см. § 93).

При этом трансформатор условно считается однородным телом с одинаковой во всех точках температурой (при масляном охлаждении считают по температуре в верхнем слое масла).

Если при начале работы, т. е. при $t = 0$, температура трансформатора была равна температуре ϑ_0 окружающей среды и $\tau_0 = \vartheta - \vartheta_0 = 0$, то интеграл уравнения (179) дает превышение τ температуры трансформатора за время t в виде:

$$\tau = \tau_m (1 - e^{-\frac{t}{T}}). \quad (180)$$

Нетрудно подсчитать, что независимо от значения T при:

$t = T$	$2 T$	$3 T$	$4,6 T$
$\tau = 0,633$	$0,865$	$0,95$	$0,99$ от τ_m

По этим четырем точкам можно построить кривую нагревания довольно точно, зная величины T и τ_m . На рис. 170 дан примерный вид ее (кривая a). Другой, графический, способ построения этой кривой основан на следующем свойстве показательной кривой. Если из любой точки A кривой нагревания опустить перпендикуляр AB на асимптоту MN , проведенную на

¹ Получается из основного уравнения нагревания тела весом G со средней теплоемкостью c , в котором выделяется тепло потерь P_Σ и которое одновременно на всей поверхности O охлаждения имеет коэффициент K теплоотдачи, а именно:

$$P_\Sigma dt = K \cdot O \cdot \tau \cdot dt + c \cdot G \cdot d\tau.$$

расстоянии τ_m параллельно оси Ot , и в той же точке A провести касательную AC до пересечения с асимптотой в точке C , то отрезок $BC = \text{const} = T$.

На этом и основывается следующее графическое построение кривой нагревания при известных T и τ_m (рис. 171).

Проведя линию MN параллельно оси Ot на расстоянии τ_m и отложив $MP = T$ в масштабе времени, соединяют точку P с O , затем от точек O и P откладывают вправо по оси времени и, соответственно, по линии PV произвольные, но равные отрезки времени (примерно равные $\frac{1}{4} \div \frac{1}{3} T$). Получаются точки $1, 2, 3, 4, 5$ и т. д. и, соответственно, $1', 2', 3', 4', 5'$ и т. д.

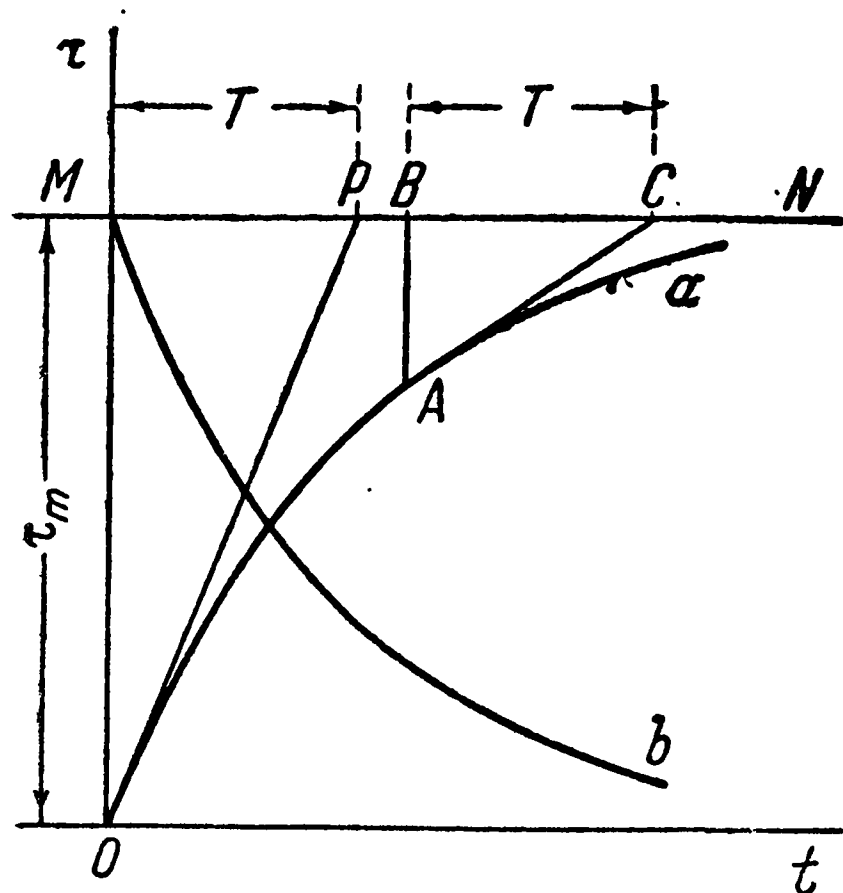


Рис. 170. a — кривая нагревания трансформатора; b — кривая охлаждения.

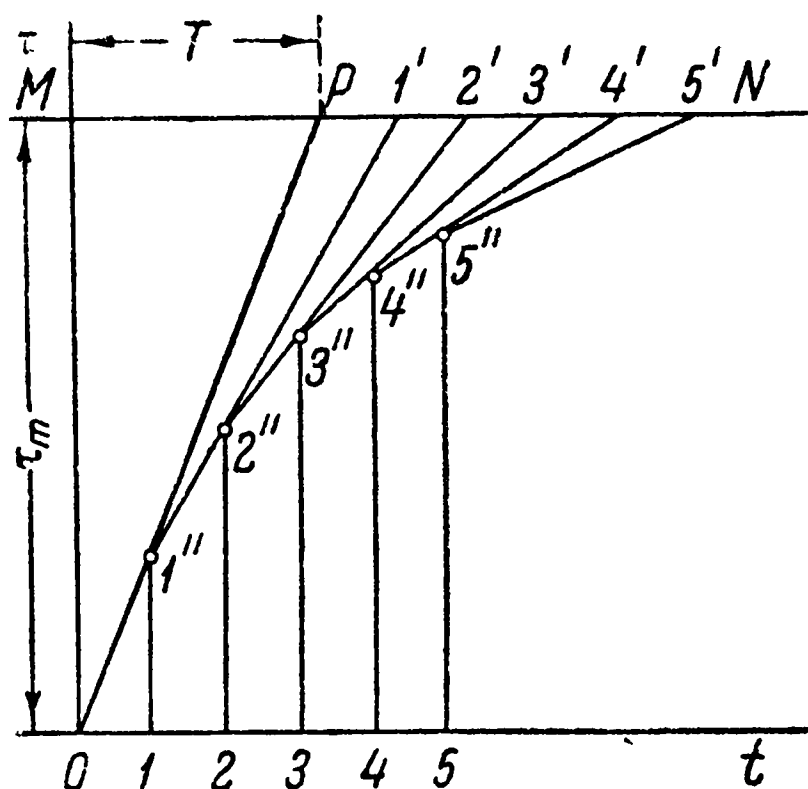


Рис. 171. Графическое построение кривой нагревания.

Затем восстанавливают из точки 1 перпендикуляр $1-1''$ до пересечения с прямой OP и точку $1''$ соединяют с точкой $1'$; потом восстанавливают перпендикуляр $2-2''$ до пересечения с линией $1''-1'$ в точке $2''$ и соединяют точку $2''$ с точкой $2'$ и т. д. Соединяя по лекалу точки $1'', 2'', 3''$ и т. д. плавной линией, получают примерную кривую нагревания. Следует помнить, что линия OP должна остаться касательной к кривой нагревания в начале координат.

Кривая охлаждения трансформатора выражается уравнением:¹

$$\tau = -T \frac{d\tau}{dt}, \quad (181)$$

интеграл которого дает кривую охлаждения в виде

$$\tau = \tau_m \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (182)$$

¹ Получается из основного уравнения охлаждения тела, характеризующегося постоянными G, c, K, O, P_{Σ} (см. предыдущую сноску), а именно:

$$-G \cdot c \cdot d\tau = K \cdot O \cdot \tau \cdot dt.$$

где τ_m есть значение τ при $t=0$, а T — имеет прежнее значение. Кривая b охлаждения (рис. 170) представляет зеркальное изображение кривой нагревания a . Ось Ot и асимптота MN как бы меняются при этом местами.

§ 93. Постоянные нагревания трансформатора

1. **Постоянная T нагревания всего трансформатора.** Эта величина по самому ее определению (§ 92) равна:

$$T = \frac{\Sigma (G \cdot c \cdot \tau_m)}{3600 \cdot P_{\Sigma}} \text{ час.}, \quad (183)$$

где суммирование распространено на все нагревающиеся части трансформатора; для каждой из них G — вес в килограммах, c — теплоемкость в ватт-секундах на 1 kG и 1°C , τ_m — конечное превышение температуры, P_{Σ} — общие потери трансформатора в ваттах.

При достижении установившейся температуры общие потери трансформатора:

$$P_{\Sigma} = K \cdot \tau_m \cdot O \text{ W}, \quad (184)$$

где K — коэффициент теплоотдачи, средний для всей поверхности охлаждения O трансформатора.

Если считать превышение температуры всех частей трансформатора одинаковым и равным τ_m , получаем из формул (183) и (184):

$$T = \frac{\Sigma (G \cdot c)}{3600 \cdot K \cdot O} \text{ час.} \quad (185)$$

Выраженная в таком виде величина T зависит от свойств данного трансформатора (величин G, c, K, O), но не от потерь в нем.

Однако подсчет величины T ведется всегда по формуле (183). Поскольку отдельные части трансформатора — обмотки, сердечник, масло, бак — могут иметь разные превышения температуры, это надо учитывать или по опытным данным, или по Правилам и Нормам. При этом среднее превышение температуры масла можно определять по заданному наибольшему и по соотношению между средним и наибольшим (§ 99).

Нижняя часть бака остается почти холодной, а потому превышение температуры самого бака можно принимать равным $25 \div 35^\circ\text{C}$, в зависимости от системы охлаждения (считая по общему весу бака с тележкой, которая всегда остается холодной).

Для расчета все теплоемкости c берутся из табл. IV в приложении. Нетрудно усмотреть, что для трансформаторов с масляным охлаждением постоянная T определяется, главным образом, количеством масла в виду большой теплоемкости последнего.

При ориентировочных расчетах для трансформаторов с естественным масляным охлаждением считают иногда среднюю теплоемкость всего трансформатора без масла равной 0,12, а масла — 0,5 kWh на 1 t и 1°C [Л. 170].

Тогда, например при $\tau_m = 50^\circ \text{C}$, при весе трансформатора без масла G_{mp} и весе масла G_{mc} (все в тоннах):

$$T = \frac{50 \cdot (G_{mp} \cdot 0,12 + G_{mc} \cdot 0,5)}{P_\Sigma} = \frac{6G_{mp} + 25G_{mc}}{P_\Sigma} \text{ час.}, \quad (186)$$

где P_Σ — общие потери в киловаттах. Очевидно, что большой относительный вес активных материалов трансформатора (формула 183) ведет к увеличению T , а большое использование их — к уменьшению T . Для трансформаторов на 6 kV по ОСТ 2524 значение T составляет при $P = 20 \text{ kVA}$ 5 час., при $P = 100 \text{ kVA}$ и больше — около 3 час.; для трансформаторов с внутренним масляным и циркуляционным охлаждением $T = 2 \div 2,5$ часа из-за относительно малого количества масла.

2. Постоянная нагревания обмотки. У трансформаторов с воздушным охлаждением постоянная T имеет несколько условный смысл, поскольку выше (§ 79) было предположено, что в тепловом отношении сердечник и обмотки представляют тела независимые; масло же в данном случае отсутствует. Поэтому полезно вообще ввести в расчеты постоянную T_m нагревания самой обмотки (вместе с ее изоляцией). Очевидно, что эта постоянная, выраженная в минутах, равна:

$$T_m = \frac{\tau_m \cdot (G_m \cdot c_m + \iota \cdot G_u \cdot c_u)}{60 \cdot P_m}, \quad (187)$$

где τ_m — среднее превышение температуры данной обмотки; ι — коэффициент, учитывающий более низкую температуру изоляции по сравнению с температурой самой обмотки, $\iota = 0,5 \div 0,7$; P_m — потери в данной обмотке.

Этой постоянной можно пользоваться и для трансформаторов с масляным охлаждением, например, при расчете превышения температуры обмотки при коротких замыканиях (§ 96).

§ 94. Основные следствия уравнения нагревания трансформатора

1. Теорема. Тангенс угла α_0 , составленного касательной к кривой нагревания с осью Ot в начале координат, пропорционален величине P_Σ полных потерь трансформатора. Действительно (рис. 172), из треугольника OMP имеем:

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{\tau_m}{T} = \frac{\tau_m \cdot P_\Sigma}{G \cdot c \cdot \tau_m} \equiv P_\Sigma.^1$$

На этой теореме основано графическое построение кривых нагревания для других нагрузок, больших или меньших номинальной P , если известны T и τ_m для номинальной нагрузки.

¹ Трансформатор здесь рассматривается как однородное тело с весом G и теплоемкостью c .

в первом приближении.

откладывают для новой нагрузки $P' > P$ новые потери $CE \equiv P'_{\Sigma}$, а для нагрузки $P'' < P$ — новые потери $CF \equiv P''_{\Sigma}$.

Соединяя соответственно точки E и F с точкой O , находят в пересечении с линией PR точки S и Q , соответствующие новым значениям τ'_m и τ''_m .

Далее, принимая за асимптоты линии SS' и QQ' , параллельные MN , можно построить и новые кривые нагревания, пользуясь приемом, описанным в § 92.

2. *Теорема.* Если температура нагревающегося трансформатора поднимается на 1°C в час, то окончательное превышение температуры получится, если к наблюдаемому в это время превышению прибавить еще столько градусов, сколько часам равняется постоянная нагревания. Действительно, из уравнения нагревания (формула 179) получается:

$$\tau_m = \tau + T \frac{d\tau}{dt}.$$

Для конечных промежутков времени:

$$\tau_m = \tau + T \frac{\Delta \tau}{\Delta t}. \quad (188)$$

Если $\frac{\Delta \tau}{\Delta t} = \frac{1^\circ \text{C}}{1 \text{h}} = 1$, то $\tau_m = \tau + T^\circ \text{C}$, что и требовалось доказать.

3. Уравнение нагревания дает возможность графически находить окончательное превышение температуры по тем отсчетам температур, произведенным во время нагревания через равные промежутки времени, задолго до того как температура приблизится к окончательному значению.

В самом деле, из формулы 188 имеем:

$$\tau_m - \tau = \frac{T}{\Delta t} \cdot \Delta \tau.$$

Это — уравнение прямой, проходящей через точку M (рис. 173) в координатах τ и $\Delta\tau$, причем $\frac{T}{\Delta t} = \text{const}$. Поэтому, наблюдая превышения температуры τ_1, τ_2 и τ_3 в моменты 1, 2, 3 через доста-

точные промежутки времени ($1/2 \div 1$ час), откладывая $AA' = \Delta\tau_1 = \tau_2 - \tau_1$ и $BB' = \Delta\tau_2 = \tau_3 - \tau_2$, соединяя A' с B' и продолжая $A'B'$ до точки M , находим $MO = \tau_m$.

По аналогии с этим на основе уравнения охлаждения можно найти построением неизвестное начальное превышение температуры обмоток трансформатора в момент его выключения, если, отметив этот момент, в дальнейшем произвести три измерения (третье для проверки) температур через промежутки времени Δt , равные тому, который прошел от момента выключения до первого измерения.¹

Из уравнения охлаждения (формула 181', для конечных промежутков времени) имеем:

$$\Delta\tau = -\frac{\Delta t}{T} \cdot \tau.$$

Это — уравнение прямой OM' в координатах $\Delta\tau$ и τ во втором квадранте (рис. 174); поэтому отложив $AA' = \tau_1 - \tau_2 = \Delta\tau_1$ и соединяя A' с B , проводят $AM' \parallel A'B$ до пересечения с линией OM' в точке M' . Тогда OM и есть искомое τ_m . Отрезок $B'B$ должен при проверке равняться $\Delta\tau_2 = \tau_2 - \tau_3$.

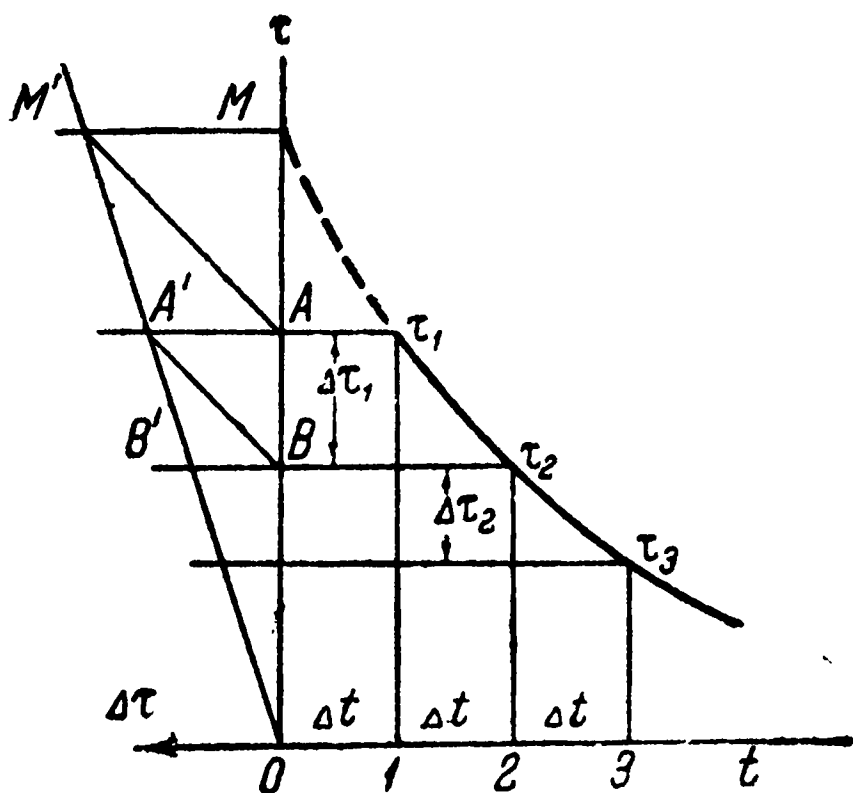


Рис. 174. Графическое определение начального повышения температуры при охлаждении.

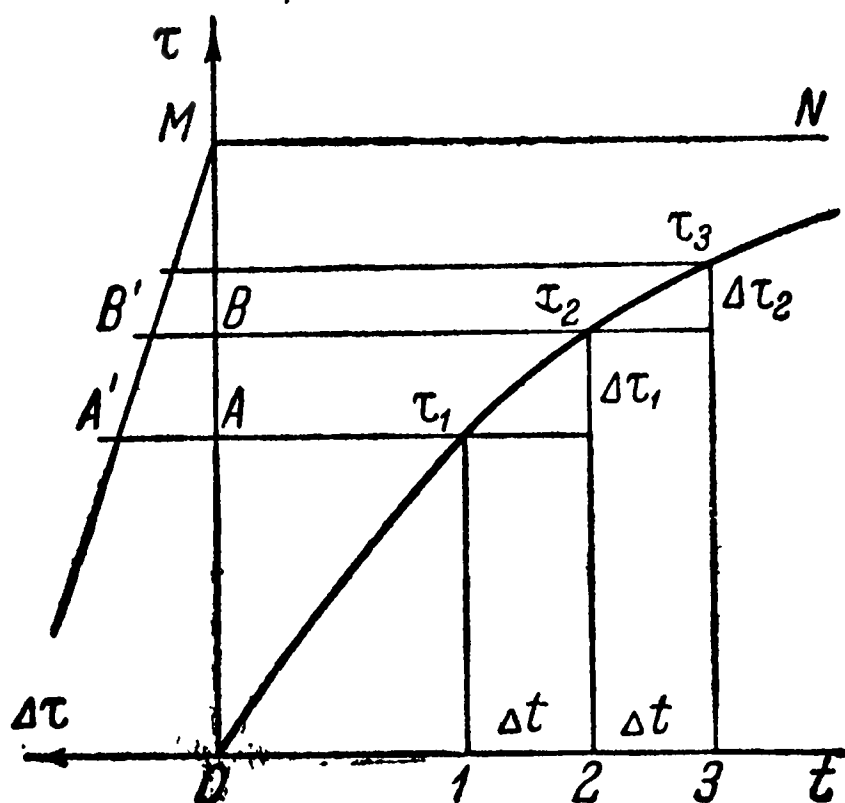


Рис. 173. Графическое определение конечного повышения температуры при нагревании.

4. Поскольку коэффициент теплоотдачи через конвекцию и излучение не постоянен, но примерно пропорционален $\sqrt[4]{\tau}$ (§ 82), т. е.

$$K = K_1 \cdot \tau^{\frac{1}{4}}, \quad (189)$$

где K_1 — величина постоянная для всех нагрузок, то величина T оказывается постоянной лишь для определенного режима потерь, т. е. для определенной нагрузки. Действительно:

$$T = \frac{G \cdot c \cdot \tau_m}{P_{\Sigma}} = \frac{G \cdot c \cdot \tau_m}{K \cdot O \cdot \tau_m} = \frac{G \cdot c \cdot \tau_m}{K_1 \cdot O \cdot \tau_m^{\frac{5}{4}}} = \frac{G \cdot c}{K_1 \cdot O \cdot \tau_m^{\frac{1}{4}}}.$$

¹ Ввиду малой величины T_m отсчеты производят при этом через $1/2 \div 2$ мин.

Таким образом:

$$T \cdot \tau_m^{\frac{1}{4}} = \frac{G \cdot c}{K_1 \cdot O} = \text{const.} \quad (190)$$

Это — уравнение гиперболы в координатах T и τ_m . Следовательно T уменьшается с увеличением τ_m , т. е. с ростом нагрузки [Л. 4, стр. 351].

Пусть, например, $\tau_m = 50^\circ \text{C}$ и $T = 3$ часа; тогда при:

$\tau_m = 60$	40	30	20°C
$T = 2,87$	3,17	3,4	3,76 часа

В построение п. 1 (рис. 172) придется ввести поправку. Через точку P вместо прямой линии PR следует провести гиперболу PR_1 , уравнение которой представляет формула (190); ее нетрудно построить по точкам, зная T и τ_m для номинальной нагрузки, и задаваясь разными значениями τ_m . Далее следует вести построение, описанное в п. 1, с той лишь разницей, что лучи OF и OE надо доводить до пересечения с гиперболой PR_1 , а не с прямой PR . Очевидно, что новые асимптоты $S_1S'_1$ и $Q_1Q'_1$, определяющие истинные значения превышений температур, будут лежать: первая — ниже SS' , а вторая — выше QQ' . В этом сказывается влияние поправки на непостоянство величины T при разных нагрузках трансформатора.

§ 95. Зависимость превышения температуры трансформатора от его нагрузки

Из вышесказанного о составляющих общего превышения температуры обмотки имеем:

1) $\tau_I \equiv q \equiv \Delta^2 \equiv P^2$ (формулы 173 и 174);

2) $\tau_{II} \equiv q^{0,8} \equiv \left(\frac{P_m}{O_m}\right)^{0,8} \equiv P^{1,6}$ (формула 152), поскольку $P_m \equiv P^2$;

3) $\tau_{III} \equiv P^{1,6}$ (формула 178);

4) зависимость τ_{IV} от нагрузки может быть получена путем построений (§ 94, п. 4), где τ и τ_m , собственно говоря, и представляли величины τ_{IV} и τ_{IVm} , т. е. внешние перепады температуры.

Таким образом, для всех слагающих: τ_I , τ_{II} , τ_{III} и τ_{IV} следует ожидать значительного увеличения их с ростом нагрузки; поэтому следует с большой осторожностью относиться к перегрузкам трансформатора. Вследствие сравнительно большого значения T трансформатор при кратковременных, но больших перегрузках может не успеть еще прогреться, т. е. перепад τ_{IV} не успеет значительно возрасти (а обычно только величину τ_{IV} и можно измерять при работе трансформатора); однако в это время, вследствие

возрастания величин τ_I и τ_{II} , обмотки могут быть уже перегреты, и изоляция их попорчена.

Таким образом низкая температура масла трансформатора (а также охлаждающей среды) не дает права без специальных расчетов делать заключение о возможных перегрузках трансформатора.

Согласно некоторым американским исследованиям, прочность изоляции сокращается примерно вдвое на каждые 8°C повышения температуры сверх предельной для данной изоляции [Л. 171—173] (относится к изоляции классов *О* и *А*, см. § 57). Особенно вредны большие и часто повторяющиеся, хотя и кратковременные перегрузки при аварийных режимах. Поэтому разработаны [Л. 171] предложения о нормировании допустимых кратковременных перегрузок в зависимости от их повторяемости и от того, при каком режиме работы трансформатора (холостой ход, полная нагрузка и т. п.) они происходят (см. также ОСТ 2524).

§ 96. Повышение температуры обмоток при коротких замыканиях

Нетрудно показать, что постоянная слагающая кривой тока короткого замыкания спадает весьма быстро (в течение нескольких периодов), а потому на нагревание обмоток при коротком замыкании не оказывает никакого влияния. Но нужно учесть, что хотя нагревание происходит весьма быстро (см. ниже), но остывают обмотки гораздо медленнее; поэтому они будут довольно долго находиться при высокой температуре. Нужно уметь вычислять как допустимую длительность коротких замыканий при заданном предельном превышении температуры обмоток, так и обратно — превышение температуры при заданной длительности коротких замыканий. Нижеследующий расчет приводится по [Л. 1, стр. 313].

Пусть начальная температура обмотки будет ϑ_n , а конечная ϑ_k через промежуток времени t_k , прошедший от начала до момента выключения короткого замыкания. Можно считать для работающего трансформатора $\vartheta_n \approx 90^\circ\text{C}$, а ϑ_k допустить равным $200 \div 250^\circ\text{C}$. Обозначим $\vartheta_n - \vartheta_k = \tau_k$.

Потери в обмотках в начале короткого замыкания составляют:

$$P_m \left(\frac{100}{e_k} \right)^2 \text{ W},$$

а в конце его:

$$P_m \cdot \left(\frac{100}{e_k} \right)^2 \cdot [1 + 0,003 \cdot \tau_k]^1 \text{ W}.$$

¹ Температурный коэффициент сопротивления меди при $\vartheta_n = +90^\circ\text{C}$ равен $\frac{1}{235 + 90} \approx 0,003$.

Поэтому все тепло, выделившееся за время короткого замыкания, будет равно:

$$P_m \cdot \left(\frac{100}{e_k}\right)^2 \cdot \left(1 + 0,003 \frac{\tau_k}{2}\right) \cdot t_k \text{ Ws.}$$

Оно равно теплу, запасенному за этот же промежуток времени в обмотках и их изоляции; это тепло составляет:

$$\tau_k \cdot (G_m \cdot c_m + G_u \cdot c_u \cdot \iota);$$

коэффициент ι — см. формулу (187).

Приравнявая между собой оба выражения для количества тепла, получаем:

$$t_k = \frac{\tau_k \cdot (G_m \cdot c_m + G_u \cdot c_u \cdot \iota)}{P_m \left(\frac{100}{e_k}\right)^2 \left(1 + \frac{\tau_k}{670}\right)} \text{ сек.} \quad (191)$$

Вводя постоянную T_m нагревания обмотки и ее изоляции в минутах (§ 93), имеем:

$$t_k = \frac{\tau_k}{\tau_m} \cdot \frac{60 T_m}{\left(\frac{100}{e_k}\right)^2 \left(1 + \frac{\tau_k}{670}\right)} \text{ сек.}$$

Подставляя в формулу (191) значения:

$$c_m = 390 \frac{\text{Ws}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}, \quad P_m = 2,5 \cdot \Delta^2 \cdot G_m,^1 \quad \iota = 0,5,$$

$$c_u = 2000 \frac{\text{Ws}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}, \quad \vartheta_n = +90^\circ\text{C}, \quad \vartheta_k = +200^\circ\text{C}, \quad \tau_k = 110^\circ\text{C},$$

получаем:

$$t_k = 1,47 \cdot \left(\frac{e_k}{\Delta}\right)^2 \cdot \left(1 + 2,5 \frac{G_u}{G_m}\right) \text{ сек.} \quad (192)$$

В среднем можно принять $\frac{G_u}{G_m} \approx 0,08$ (для низковольтных трансформаторов несколько меньше, для высоковольтных больше). Тогда:

$$t_k \approx 1,75 \left(\frac{e_k}{\Delta}\right)^2 \text{ сек.} \quad (193)$$

Таким образом, выдержка времени реле и самого масляного выключателя зав.слт от e_k и Δ защищаемого ими трансформатора.

Из формулы (193) получается важное для проектирования трансформаторов следствие.

¹ Считая с добавочными потерями.

Поскольку упомянутая выдержка обычно более, или равна 2 сек., численное значение e_k должно быть более численного значения Δ .

Из формулы (191) получается:

$$\tau_k = \frac{670 \cdot t_k}{10,4 \cdot \left(1 + 2,5 \frac{G_u}{G_m}\right) \cdot \left(\frac{e_k}{\Delta}\right)^2 - t_k} \quad (194)$$

или, при

$$\frac{G_u}{G_m} = 0,08:$$

$$\tau_k = \frac{670 \cdot t_k}{12,5 \left(\frac{e_k}{\Delta}\right)^2 - t_k} \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Если

$$\frac{e_k}{\Delta} = \frac{12}{4} = 3 \quad \text{и} \quad t_k = 5 \text{ сек.},$$

то

$$\tau_k = \frac{670 \cdot 5}{12,5 \cdot 9 - 5} \approx 31^\circ\text{C}.$$

Если короткое замыкание произошло при температуре обмотки 90°C , то в конце короткого замыкания температура достигнет до $90 + 31 = 121^\circ\text{C}$ и затем будет медленно падать.

ГЛАВА XI

ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ БАКОВ И ОХЛАДИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

§ 97. Определение размеров баков и кожухов

У трансформаторов с масляным охлаждением размеры баков определяются, с одной стороны, размерами выемной части трансформатора, а с другой — величиной общих потерь в нем (если бак служит для отведения этих потерь).

Внутренние размеры бака в плане нетрудно определить по эскизу выемной части трансформатора. При этом необходимо предусмотреть место для отводов, переключателей, шин и крепления всех этих деталей, а также — необходимые и достаточные расстояния от всех токоведущих частей до стенок бака, зависящие не только от рабочего напряжения (при 6 kV — $40 \div 50$ mm, при 110 kV — $250 \div 300$ mm), но и от мощности, вернее размеров, трансформатора, ибо эти расстояния определяют возможность безопасного подъема выемной части из бака и обратного опускания.

Размеры бака в плане стараются сделать минимальными, ибо они сильно увеличивают объем и вес масла; особенно неприятно добавочное увеличение размеров в плане, на которое приходится

иногда итти из-за ненормально большого числа изоляторов на крышке бака. Для стержневых трансформаторов можно считать (рис. 176) длину бака $A_{\delta} = 2c + 170 \text{ mm}^1$ для однофазных трансформаторов и $3c + 170 \text{ mm}$ для трехфазных, а ширину бака $B_{\delta} = c + 220 \text{ mm}$ (то и другое для трансформаторов мощностью порядка сотен и нескольких тысяч киловольтампер).

Высоту бака, если это нужно, увеличивают охотнее, чем размеры в плане, но конечно есть случаи, когда ее всеми мерами приходится снижать (шахтные трансформаторы, сверхмощные трансформаторы, рассчитанные на „вписывание“ в габарит железных дорог при перевозке их в собственном баке с маслом в готовом для включения виде и др.). Поскольку размеры бака в плане берутся возможно меньшими, высота бака в основном зависит от системы охлаждения трансформатора, вернее от того, должен ли сам бак отводить все тепло потерь, или же для этого имеются специальные охладители.

В последнем случае высота бака определяется высотой выемной части и необходимым по высоте местом для нижних частей изоляторов, для переключающих устройств и т. д., с соблюдением при этом требуемых изоляционных расстояний от токоведущих частей до заземленных деталей (бак, сердечник и пр.).

При расположении изоляторов по рис. 124 высота бака сокращается и от длины изоляторов не зависит.

Общий принцип теплового расчета бака, служащего в качестве охладителя масла, заключается в следующем. Зная из предыдущих расчетов (§ 87, 89, 90) величины τ_I , τ_{II} и τ_{III} , находят допустимую величину $\tau_{IV} = \tau_{\text{м}} - (\tau_I + \tau_{II} + \tau_{III})$, а затем по этому значению τ_{IV} , пользуясь указаниями практики, выбирают профиль волн для волнистого бака или иного охладителя, или же число рядов трубок для бака трубчатого; по этим последним данным находят допустимое значение удельной тепловой загрузки q_{δ} бака, а по последней цифре и по общим потерям P_{Σ} трансформатора определяют и общую потребную поверхность O_{δ} бака или иного охладителя:

$$O_{\delta} = \frac{1,1 \cdot P_{\Sigma}}{q_{\delta}} \text{ m}^2. \quad (195)$$

Активной охлаждающей поверхностью бака являются: боковая поверхность и крышка в случае, если имеется консерватор для масла (§ 58) и, следовательно, весь бак заполнен маслом, и только одна боковая поверхность до уровня масла, если консерватор отсутствует.

Множителем 1,1 в формуле (195) учитывается допуск в потерях, которые обычно гарантируются с точностью $\pm 10\%$ их величины, причем, конечно, трансформатор не должен перегреваться сверх нормы. По размерам бака в плане определяют количество волн

¹ c — расстояние между ссями стержней.

или трубок, могущих разместиться на его стенках, а зная уже профиль волн или число рядов трубок, определяют и активный периметр бака p_δ . Активная высота волн или трубок $H_\delta = \frac{O_\delta}{p_\delta}$.

Полная высота бака несколько больше (см. примеры расчетов 1 и 3). Расчет бака без волн или трубок соответственно проще (§ 98). Из изложенного понятно, что имеется тесная связь между внутренними (τ_I , τ_{II} и τ_{III}) и внешним (τ_{IV}) перепадами температуры в трансформаторе. Чем больше первые, тем меньше останется на долю последнего, и тем меньше будет допустимое значение q_δ , а значит тем больше потребуется поверхность бака или охладителя. Величина τ_{IV} лежит обычно в пределах $35 \div 45^\circ \text{C}$; не следует забывать, что это есть средний перепад температуры между стенками бака и окружающим воздухом (§ 80).

Наличие или отсутствие консерватора влияет на конструкцию баков. Баки без него проще, так как покрываются тонкой крышкой без уплотнений; изоляторы тогда устанавливаются на стенках бака (рис. 124). Напротив, баки с консерватором требуют весьма надежного уплотнения. Крышки больших баков получают дополнительное укрепление путем приваривания изнутри уголков или швеллеров; изоляторы тогда устанавливаются на крышке.

Что касается кожухов трансформаторов с воздушным охлаждением, то расчет их обычно не производится, однако, принимаются меры к надлежащей вентиляции кожуха во избежание застоя воздуха в нем, вследствие чего температура воздуха внутри могла бы подняться на $25 \div 35^\circ \text{C}$ выше температуры окружающего воздуха; этим, конечно, были бы нарушены все тепловые расчеты, и трансформатор при этом перегрелся бы.

§ 98. Баки гладкие

Так называют для простоты баки, не имеющие волн, трубок или радиаторов; поверхность их рассчитывается по формуле (195), где q_δ представляет в данном случае абсциссу кривой с рис. 146 по полученной расчетом (§ 97) ординате τ_{IV} .

Гладкие баки могут иметь лишь сравнительно небольшую активную поверхность; в противном случае они получаются слишком громоздкими. Вот почему для трансформаторов с естественным масляным охлаждением такие баки применяются при мощностях не свыше 20 kVA, т. е. при P_Σ примерно до 1000 W. Толщина стенки $1 \div 3 \text{ mm}$ выбирается пропорционально степени 1,5 от высоты столба масла в баке.

Для весьма мощных трансформаторов с отдельными охладителями масла или внутренним водяным охлаждением (§ 103) тоже применяют гладкие баки. Конечно, соответственно размерам и испытательному давлению (§ 107) выбирают и толщину стенок $6 \div 12 \text{ mm}$, а дна и крышки $10 \div 25 \text{ mm}$.

§ 99. Баки волнистые

При мощности нормальных трансформаторов с масляным охлаждением свыше $20 \div 30$ kVA поверхность гладкого бака становится уже недостаточной для охлаждения и ее приходится увеличивать.

Необходимо уяснить себе существенную разницу в расчете волнистого бака по сравнению с гладким. В то время как у последнего вся поверхность отдает тепло как конвекцией, так и излучением, у волнистого бака теплоотдача через конвекцию происходит с поверхности, соответствующей всему периметру p_δ бака, но теплоотдача через лучеиспускание — лишь с поверхности, соответствующей проекции всего периметра на внутренний обвод бака, т. е. с поверхности, равной $2(A_\delta + B_\delta) \cdot H_\delta$ (рис. 176).

Причина лежит в том, что соседние волны обогревают друг друга своим взаимным излучением. Поэтому в расчеты входит

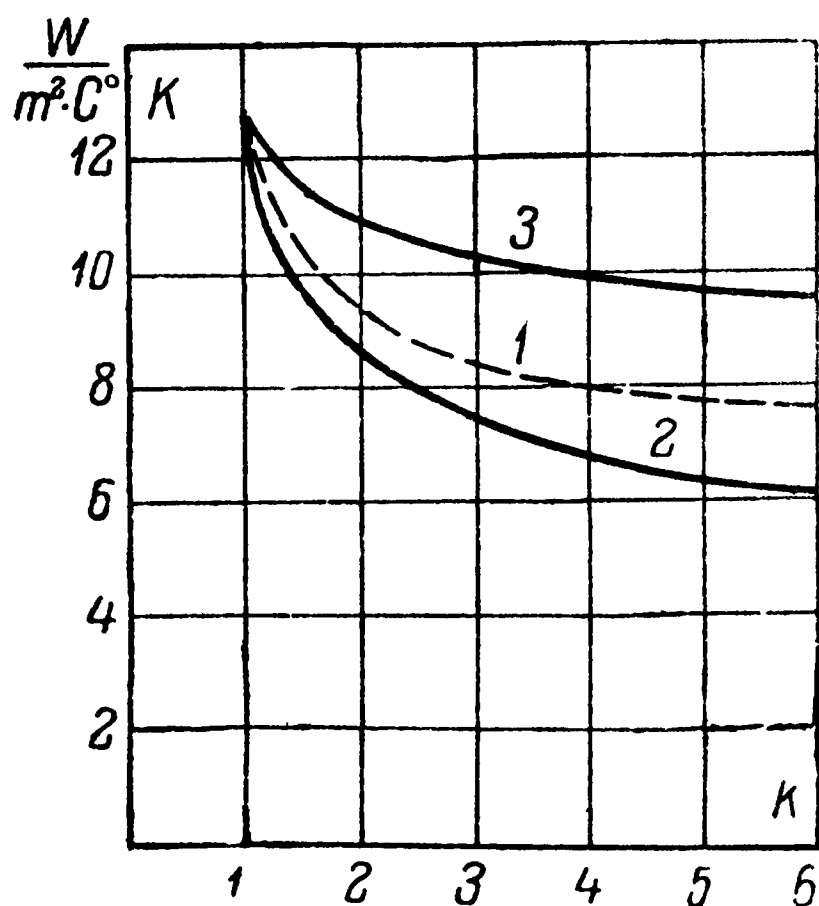


Рис. 175. Кривые полной теплоотдачи баков: 1 — волнистых (теоретическая кривая); 2 — волнистых (практическая кривая при малых b_δ); 3 — трубчатых.

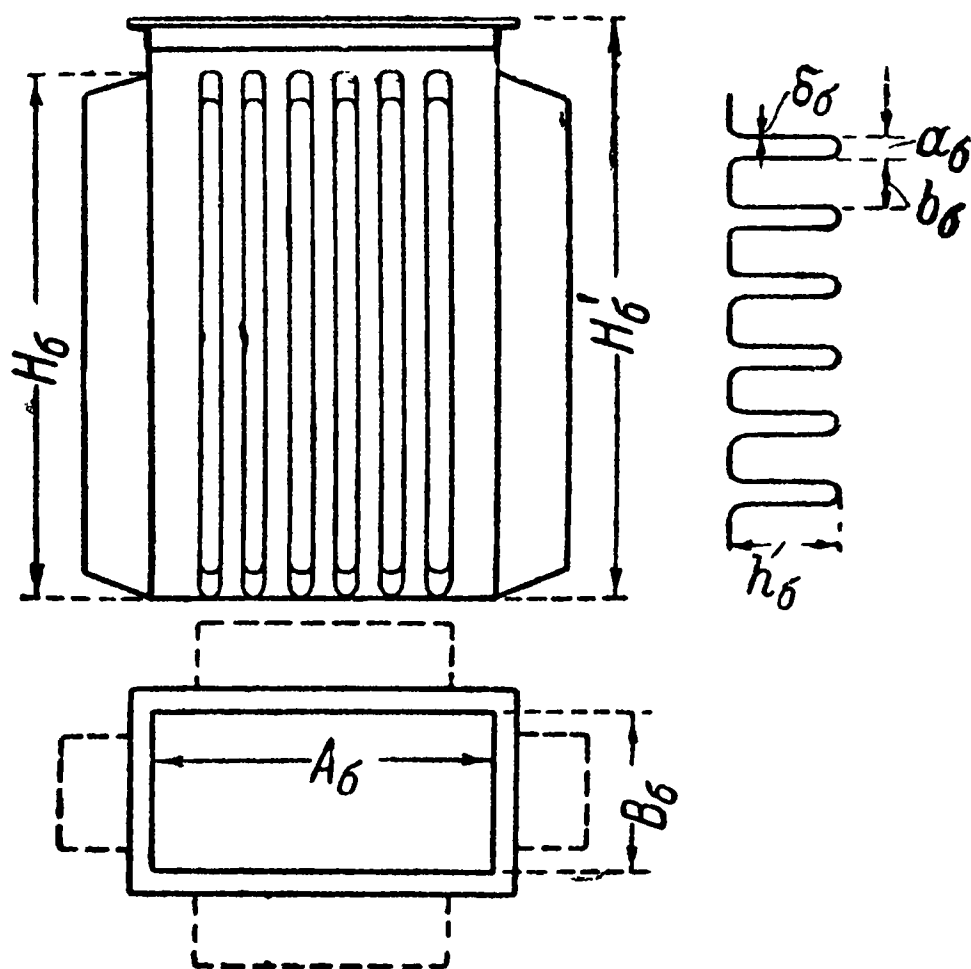


Рис. 176. Эскиз волнистого бака.

не общий коэффициент теплоотдачи $K_k + K_u$, а другой, который, будет тем меньше, чем относительно глубже будут волны, т. е. чем больше будет величина h_δ (рис. 176).

Действительно, если принять поверхность гладкого бака за единицу (например 1 m^2) и считать, что благодаря добавлению волн она увеличится в k раз, т. е. сделается равной $k \text{ m}^2$, то будут отдавать тепло: поверхность 1 m^2 — через конвекцию и излучение, поверхность $(k - 1) \text{ m}^2$ — через конвекцию.

В этом случае общий коэффициент теплоотдачи волн будет равен:

$$K_{\text{вл}} = \frac{(k-1)K_k + 1 \cdot (K_k + K_u)}{k} = K_k + \frac{K_u}{k} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}. \quad (196)$$

При $k=1$, $K_{\text{вл}}=K_k+K_u$, что понятно само собой. При очень большом k величина $K_{\text{вл}}$ стремится к K_k , и излучение практически перестает оказывать влияние. Поэтому волны с размером h_δ , бóльшим 300 мм, не применяются, так как дальнейшее увеличение h_δ не компенсирует снижения $K_{\text{вл}}$.

Для среднего значения $\tau_{\text{IV}}=45^\circ\text{C}$ имеем:

$$K_u = 6,2 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \quad (\text{табл. 37}); \quad K_k = 6,5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \quad (\text{формула 145}).$$

Подставляя эти значения в формулу (196), имеем:

$$K_{\text{вл}} = 6,5 + \frac{6,2}{k} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}. \quad (197)$$

На рис. 175 (кривая 1) приведена эта зависимость. Например, при волне (рис. 176) с размерами $a_\delta=20$ мм, $b_\delta=60$ мм, $h_\delta=300$ мм, будет:

$$k = \frac{80 + 560}{80} = 8;$$

при этом размер 560 мм взят вместо $2 \cdot 300 = 600$ мм с учетом закруглений в углах волн.

Общий коэффициент теплоотдачи для этого случая будет равен:

$$K_{\text{вл}} = 6,5 + \frac{6,2}{8} = 7,28 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}},$$

а $q_\delta = 45 \cdot 7,28 = 326$ W/m², т. е. значительно меньше, чем для гладкого бака (см. выше). Но и это меньшее значение является чисто теоретическим; практические значения величины $K_{\text{вл}}$ при малых b_δ будут лежать еще ниже (рис. 175, кривая 2) из-за трудности циркуляции масла и воздуха при больших h_δ [Л. 174]. Поэтому теперь уже не применяются профили с $a_\delta = b_\delta$ (например, $a_\delta = b_\delta = 30$ мм) из-за их сравнительной невыгодности, а именно — большого количества масла для заполнения таких волн и в то же время недостаточной величины воздушных промежутков, в особенности при стремлении стенок волн к выпучиванию у высоких баков. Теперь берут $b_\delta/a_\delta = 3 \div 4$. Табл. 39 дает представление о применяемых профилях для трансформаторов разной мощности.

Необходимо учесть еще следующее:

а) активная высота волн будет несколько меньше H_δ из-за скосов сверху и снизу, которые необходимы для того, чтобы сваренный бак, поставленный непосредственно на пол, но еще не на свою тележку, не повреждался;

Т а б л и ц а 39

Мощность транс- форматора kVA	h_{δ} mm	a_{δ} mm	b_{δ} mm	H_{δ} mm	δ_{δ} mm ¹
30÷ 180	100	10	30	до 1000	0,75÷1,0
180÷ 560	100÷145	15	45	1000÷1500	1,0 ÷1,5
560÷1000	145÷190÷230	20	50	1500÷2000	1,5 ÷2,0
1000÷3200	300	25	60	2000÷3000	2,0 ÷2,5

б) напротив, общая высота H_{δ}' всего бака будет больше H_{δ} из-за необходимости устройства сверху пояса — „манжеты“, связующей все волны, а также из-за наличия уголка для прикрепления крышки;

с) рыночные размеры обычных листов не превосходят 3 м в длину; поэтому нельзя проектировать волнистых баков с высотой, большей 2980 mm;

д) для трансформаторов до 100 kVA бывает достаточно волн (или трубок) на баке по двум продольным сторонам, другие две тогда делаются из более толстых листов (2,5 ÷ 3,0) mm;

е) обычно глубину h_{δ} профиля нельзя выбирать произвольно по условиям производства (раскрой листов, приспособления для изготовления волн и т. д.); употребительны размеры $h_{\delta} = 100 — 145 — 190 — 230 — 300$ mm;

ф) во всех предыдущих расчетах под τ_{IV} понимался средний перепад температуры от стенки бака к окружающему воздуху. Максимальное же повышение температуры в верхних слоях масла (τ_{IVm}), ограничиваемое Правилами и Нормами, больше среднего и связано с ним такой примерной зависимостью (для волнистых баков):

$$\frac{\tau_{IVm}}{\tau_{IV}} = 1,15 \div 1,25. \quad (198)$$

Иногда [Л. 22, стр. 111] отношение $\frac{\tau_{IVm}}{\tau_{IV}}$ ставят в связь с относительной высотой размещения активной части трансформатора в баке и определяют по формуле:

$$\frac{\tau_{IVm}}{\tau_{IV}} = 1 + \frac{0,4}{\alpha}, \quad (199)$$

где $\alpha = H_a/l$; H_a — активная высота бака, считаемая в данном случае от верхнего ребра нижнего ярма до крышки, l — длина стержней трансформатора;

г) при размещении на баке волн, трубок или радиаторов нужно предусмотреть место для спускных кранов, подъемных штанг и т. д.; этим уменьшается общее число волн на баке, и некоторым волнам (или трубкам) приходится придавать мень-

¹ Толщина стенок бака.

шую против прочих высоту. Иногда в углах бака оставляют свободными от волн промежутки по $60 \div 80$ mm, где ставятся специальные угловые части из более толстых листов ($3 \div 5$ mm).

§ 100. Баки трубчатые

Недостатками волнистых баков, в особенности больших, являются: громоздкость, большой вес, малая активность больших профилей волн (§ 99) и недостаточная механическая прочность.

Вследствие последней причины трансформаторы с волнистыми баками не рекомендуется перевозить с маслом при мощностях свыше 560 kVA, а весьма большие волнистые баки перевозятся даже отдельно, без активной части трансформаторов, во избежание по-

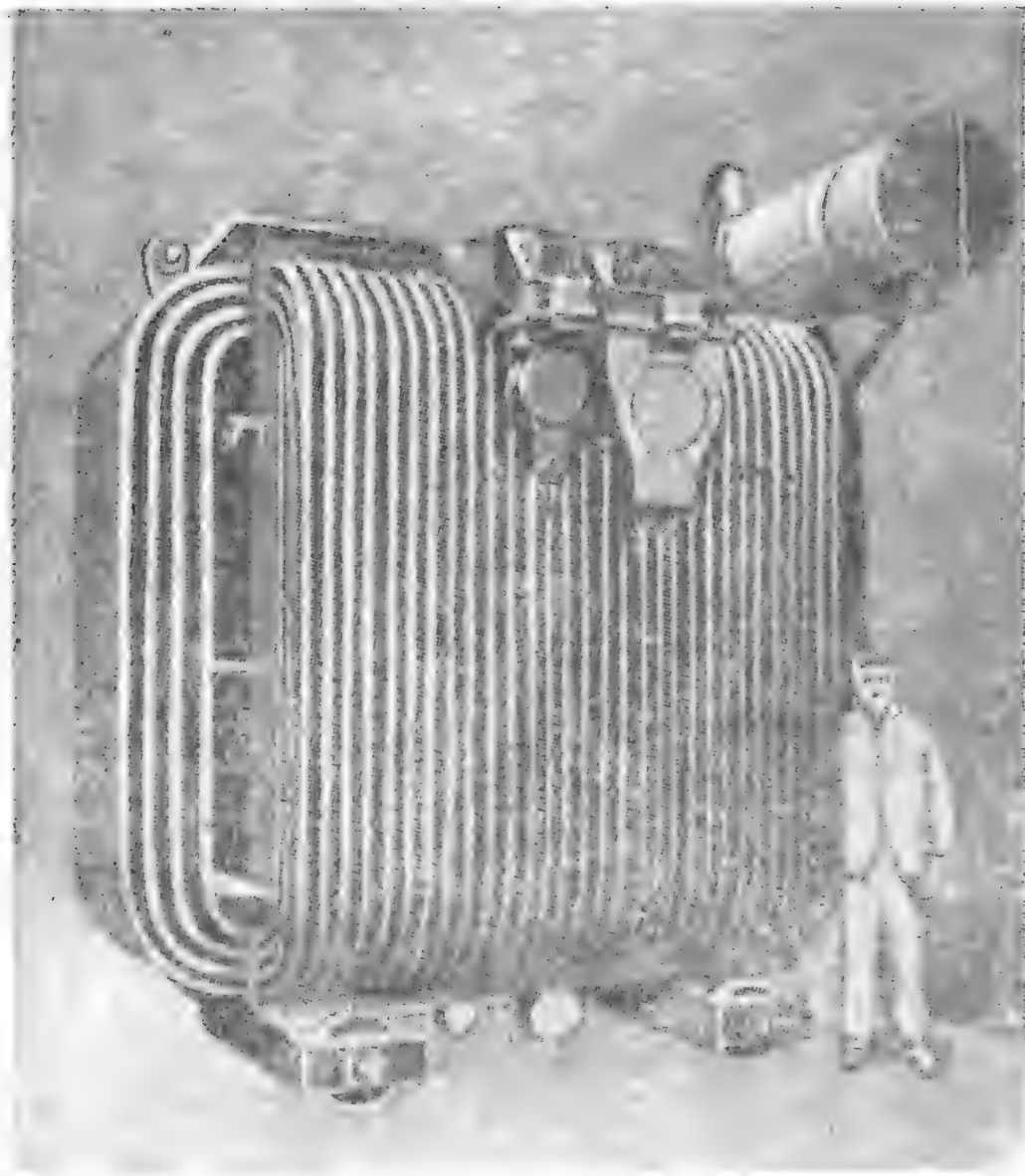


Рис. 177. Трубчатый бак трансформатора 4000 kVA, 33/6,6 kV, 50 Hz фирмы Ферранти (Ferranti).

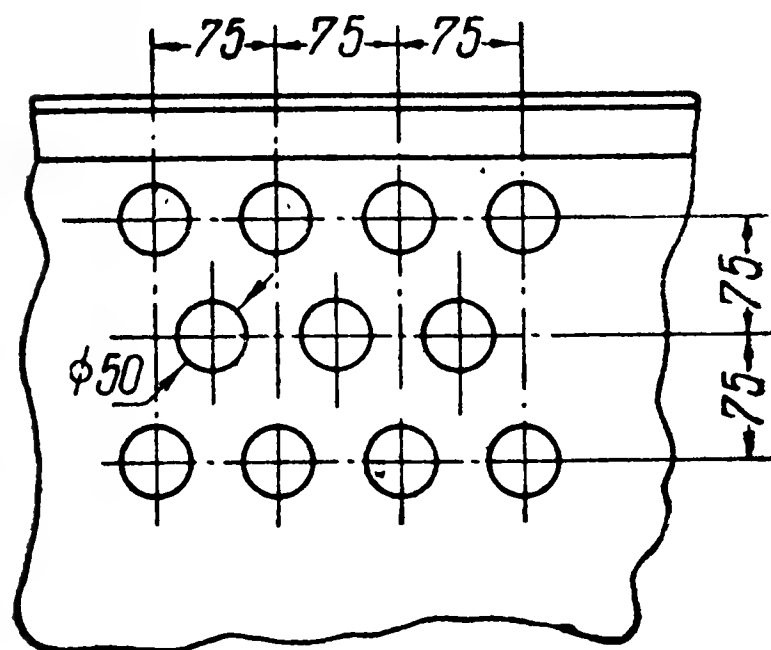


Рис. 178. Расположение трубок трубчатого бака

вреждения баков при перевозке. Можно считать, что для трансформаторов, свыше 3000 kVA, вообще не следует применять волнистых баков, так как при этом приходится или снижать общие потери (излишняя затрата меди), или же придавать баку размеры гораздо бóльшие, чем необходимы для активной части трансформатора; и то и другое решение неприемлемо.

Иногда и для небольших трансформаторов желательно иметь очень компактные баки солидной конструкции.

Общим решением и для больших, и для малых трансформаторов является применение трубчатых баков с $1 \div 5$ рядами трубок, диаметром $40 \div 50$ mm (рис. 177). Стенки бака берутся достаточно толстыми; в них вырезаются круглые отверстия, чаще всего в шахматном порядке (рис. 178). В отверстия вставляются загнутые концы трубок, развальцовываются и провариваются электросваркой.

Трубчатые баки не только прочнее, но и активнее волнистых. Действительно, по М. Видмару [Л. 4, стр. 523], для трубок вследствие улучшения циркуляции как масла, так и воздуха коэф-

фициент K_k увеличивается в $1 + 0,075 \frac{H^{\frac{1}{4}}}{d}$ раз, где H — высота трубок, а d — их диаметр; и то и другое в дециметрах.

Например, при $H = 3000 \text{ mm} = 30 \text{ dm}$ и $d = 50 \text{ mm} = 0,5 \text{ dm}$:

$$1 + 0,075 \frac{H^{\frac{1}{4}}}{d} = 1,35.$$

Пользуясь подсчетом общего среднего коэффициента теплоотдачи (§ 99), получаем в данном случае:

$$\begin{aligned} K_{m\delta} &= \frac{(k-1) \cdot K_k \cdot 1,35 + 1 \cdot (K_k + K_u)}{k} = \\ &= 1,35 K_k + \frac{K_u - 0,35 K_k}{k} \frac{W}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}, \end{aligned} \quad (200)$$

где k , K_k и K_u имеют те же значения, что в формуле (196).

Для тех же значений $K_u = 6,2$ и $K_k = 6,5 \frac{W}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$, что в § 99 имеем:

$$K_{m\delta} = 8,8 + \frac{4,08}{k} \frac{W}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \quad (201)$$

(см. рис. 175, кривая 3).

При очень больших k величина $K_{m\delta}$ стремится к 8,8 вместо 6,5, как было для больших волн (§ 99). Для расположения трубок согласно рис. 178 и для $\tau_{IV} = 45^\circ\text{C}$ в табл. 40 приведены данные для $K_{m\delta}$ и q_δ .

Как видно, все значения $K_{m\delta}$ — больше соответствующих значений $K_{\text{вл}}$ для волн. Трубчатые баки могут быть применены для трансформаторов до 10 000 и даже 15 000 kVA; завод МТЗ делает

Т а б л и ц а 40

Число рядов трубок	k	$K_{m\delta} \left(\frac{W}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right)$	$q_\delta \left(\frac{W}{\text{m}^2} \right)$
1	$\frac{75 + \pi \cdot 50}{75} = 3,1$	10,12	455
2	$\frac{75 + 2\pi \cdot 50}{75} = 5,2$	9,59	415
3	$\frac{75 + 3\pi \cdot 50}{75} = 7,3$	9,36	405
4	$\frac{75 + 4\pi \cdot 50}{75} = 9,4$	9,22	400

нормальные трансформаторы до 1800 kVA с трубчатыми баками. Другая область применения этих баков — мелкие специальные трансформаторы (шахтные и пр.).

Вследствие значительного улучшения циркуляции масла в трубках кривая распределения температуры вдоль трубок приближается к прямой линии, а отношение τ_{IVm}/τ_{IV} увеличивается иногда до $1,5 \div 1,7$.

§ 101. Баки радиаторные и отдельно стоящие радиаторные охладители

Эта конструкция дает еще одно решение задачи о значительном увеличении активной поверхности бака. Радиаторы из тру-

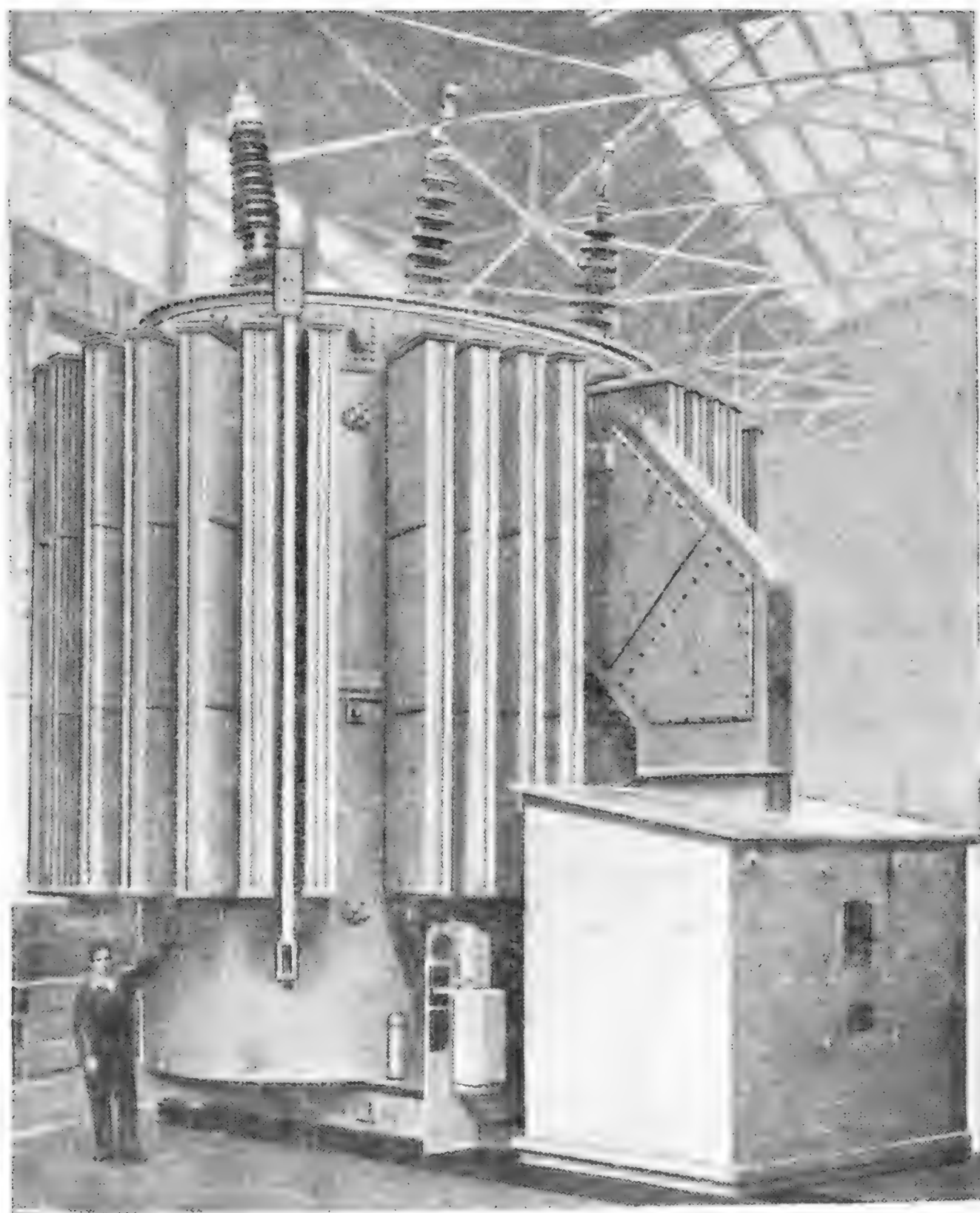


Рис. 179. Однофазный трансформатор Вестингауза (Westinghouse) 33 333 kVA, 220 kV с радиаторным баком.

бок, обычно овальных (рис. 179 и 180), или из волн (чертеж III в приложении), снимаемые при перевозке трансформатора, могут дать такое большое увеличение поверхности бака, какого нельзя достигнуть при волнистом или трубчатом баке. Благодаря

этому самые мощные трансформаторы (40 000 ÷ 50 000 kVA) могут быть построены с естественным масляным охлаждением.

При большом числе радиаторов они располагаются радиально (чертеж III), напротив, при небольшом их числе они могут быть поставлены и вдоль бака для уменьшения габарита трансформатора. Для простоты изготовления и из-за требуемой точности сборки радиаторов их делают определенных длин и с определенным количеством волн или трубок, а затем подбирают соответствующее число радиаторов стандартной поверхности (например, на чертеже III поверхность радиатора равна 22,7 m²). Теплоотдачу радиаторов и распределение температуры вдоль них можно считать такими же, как для трубок. Иногда радиаторы выполняются в виде совершенно отдельных устройств, собира-

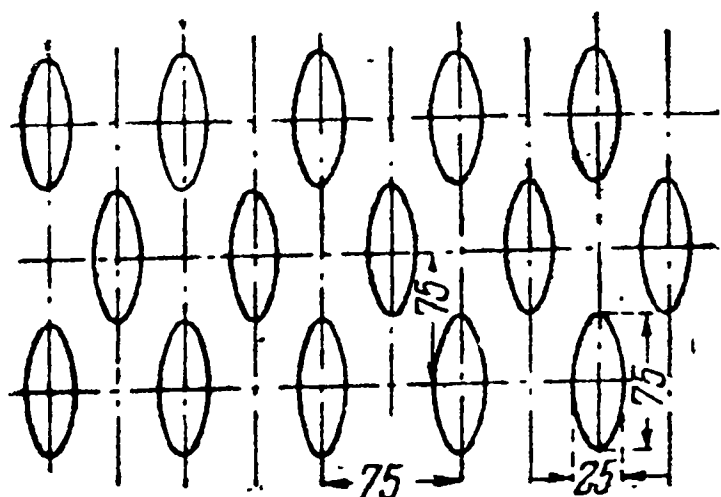


Рис. 180. Расположение овальных трубок радиаторов.

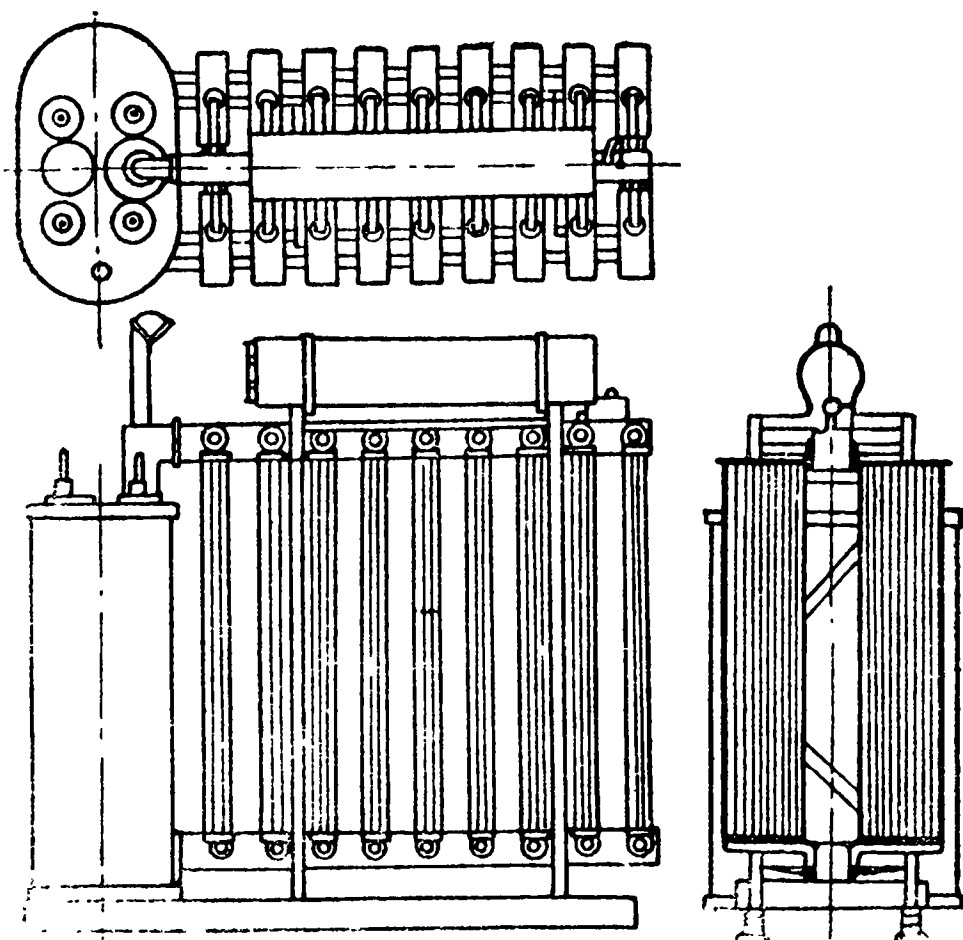


Рис. 181. Автотрансформатор GECo 20 824 kVA с батареей радиаторов.

емых на общей тележке с трансформатором, как на рис. 181, и лишь соединенных трубопроводом с трансформатором сверху и снизу. Хотя таким образом можно создать огромную поверхность охлаждения, но относительная активность ее будет невелика из-за гидравлических сопротивлений; для поднятия активности такого охладителя лучше прибегнуть к искусственной циркуляции масла в нем (§ 104).

§ 102. Действие добавочного обдувания

Предположим, что благодаря добавочному обдуванию бака (трубчатого, волнистого или радиаторного), теплоотдача увеличилась в k' раз, и коэффициент теплоотдачи:

$$K' = k' \cdot K.$$

Тогда постоянная нагревания будет равна:

$$T' = \frac{G \cdot c}{K' \cdot O} = \frac{T}{k'}, \quad (202)$$

т. е. в k' раз меньше по сравнению со значением T для трансформатора без обдувания (§ 93). При этом могут быть два случая.

а. Потери трансформатора остаются прежними. Поскольку они пропорциональны $\operatorname{tg} \alpha_0$ (см. рис. 182, а также § 94, п. 1), прямая OP занимает прежнее положение. Проводя новую асимптоту $M'P'$ так, чтобы отрезок $M'P'$ равнялся $T' = \frac{T}{k'}$, находим новое значение τ'_m , по которому можем построить и новую кривую 0—1 нагревания методом, изложенным в § 92.

б. Предельное повышение температуры остается прежним, т. е. $\tau'_m = \tau_m$ при увеличившихся в k' раз потерях, т. е. $\operatorname{tg} \alpha'_0 = k' \cdot \operatorname{tg} \alpha_0$.

Откладывая при том же τ_m отрезок $M'P'$, равный T' , получаем новую касательную OP' к кривой нагревания, а затем строим и новую кривую нагревания 0—2.

Этот случай соответствует обычной практике, когда стремятся к полному использованию трансформатора и допускают максимальные возможные повышения температуры.

Пусть для трансформатора с отношением потерь $\xi = P_c/P_m$ требуется определить возможное повышение мощности (в x раз) при добавочном обдувании его воздухом с увеличением теплоотдачи в $k' = 1,5 \div 2$ раза.

Тогда по § 74:

$$P_\Sigma = P_c + P_m = (\xi + 1) \cdot P_m,$$

$$P'_\Sigma = P_c + x^2 \cdot P_m = (\xi + x^2) \cdot P_m,$$

$$\frac{P'_\Sigma}{P_\Sigma} = k' = \frac{\xi + x^2}{\xi + 1},$$

$$\xi + x^2 = k' + k'\xi,$$

откуда

$$x = \sqrt{k' + k'\xi - \xi}. \quad (203)$$

Теплоотдачу бака легко можно удвоить при том же τ_m без чрезмерной затраты мощности на работу обдувающего вентилятора. Если принять $k' = 2$, и при этом $\xi = \frac{1}{3}$, как обычно бывает (§ 10), то:

$$x = \sqrt{2 + 2 \cdot \frac{1}{3} - \frac{1}{3}} = 1,53.$$

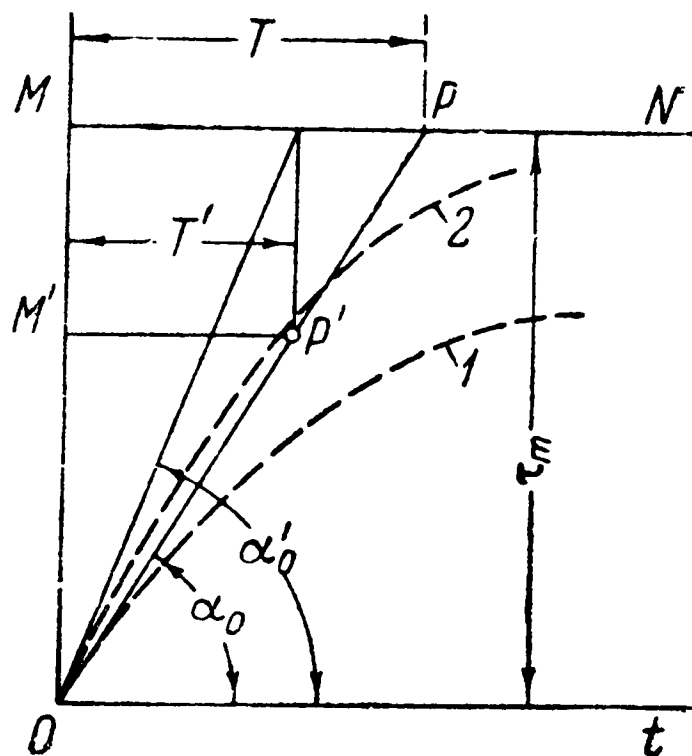


Рис. 182. Кривые нагревания при действии добавочного обдувания бака.

А так как $\frac{1}{1,53} = 0,66$, то можно сказать, что такой трансформатор может работать без добавочного обдувания до 66% своей

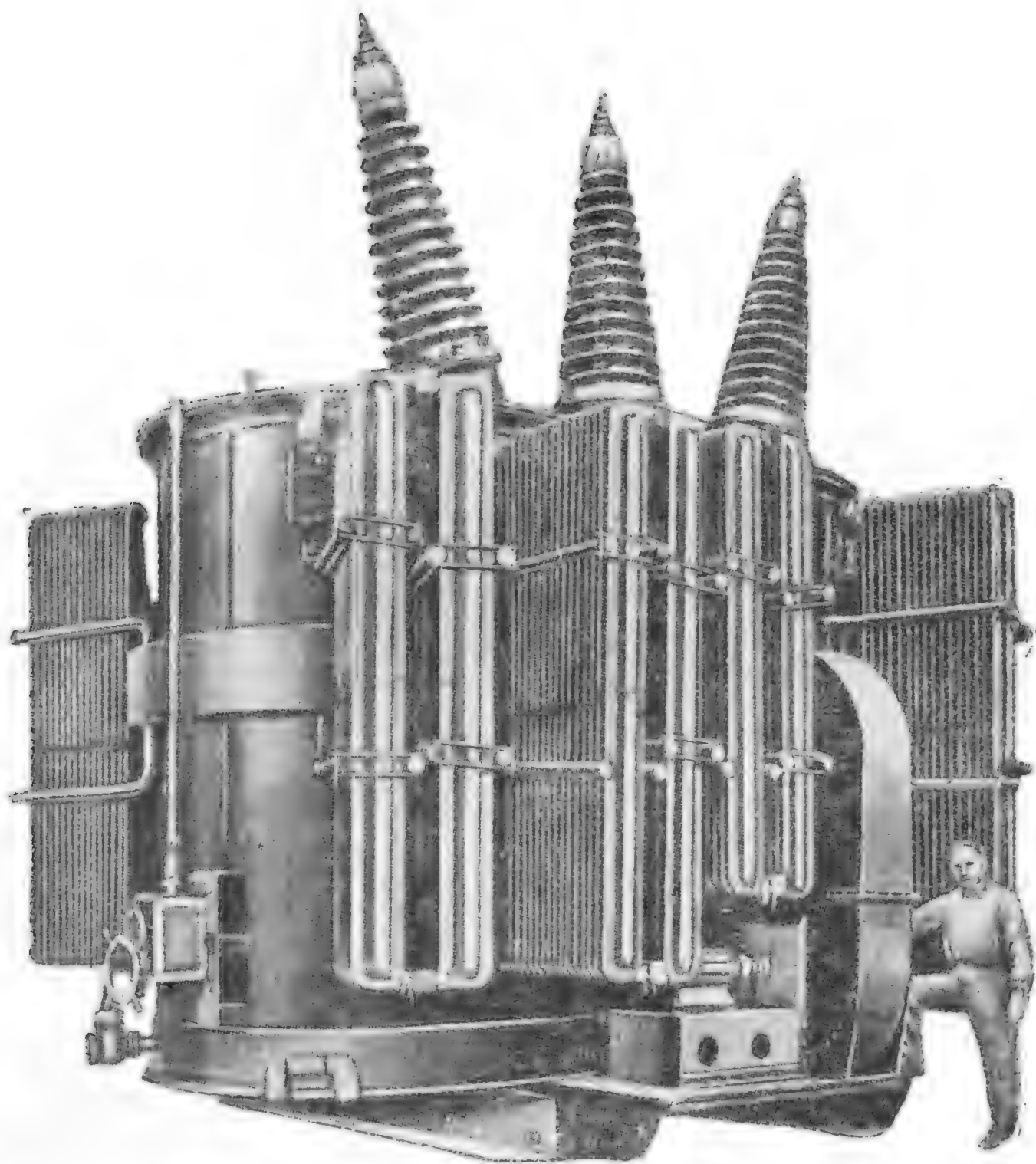


Рис. 183. Однофазный трансформатор МТЗ 15 000 кВА, 154 кВ с добавочным обдуванием.

мощности; при бóльших же нагрузках должен быть пущен в работу вентилятор.

Чаще всего вентилятор располагается рядом с трансформатором на тележке последнего и подает воздух в кольцевой

Таблица 41

Воздуха м³ в час	Мощность мотора kW	Число оборо- тов в минуту
До 10000	9	1500
10001÷16500	14	1500
16501÷25000	17	1000

канал, проходящий вокруг всего бака трансформатора; от этого канала ответвляются трубки, подводящие воздух к отдельным радиаторам (рис. 183). Иногда для каждого радиатора устанавливается свой вентилятор.

Количество подводимого воздуха составляет примерно 1,5 м³ в минуту на 1 kW потерь.

Мощность мотора для вентилятора определяется из табл. 41.

§ 103. Расчет внутреннего водяного охлаждения

При этой системе охлаждения трансформатор имеет гладкий бак; внутри, в верхней части (европейские конструкции), или по стенкам, почти по всей высоте (американские конструкции) располагаются в первом случае в $4 \div 6$, во втором — в $1 \div 2$ слоя змеевики в $2 \div 4$ параллельные нитки. Диаметр трубки $25 \div 40$ мм при толщине стенки $1,5 \div 2,0$ мм; обычно берут медные трубки, надежно соединяемые твердой пайкой (рис. 184 *b*). Медный змеевик обязательно лудится во избежание каталитического действия меди на масло (§ 58).

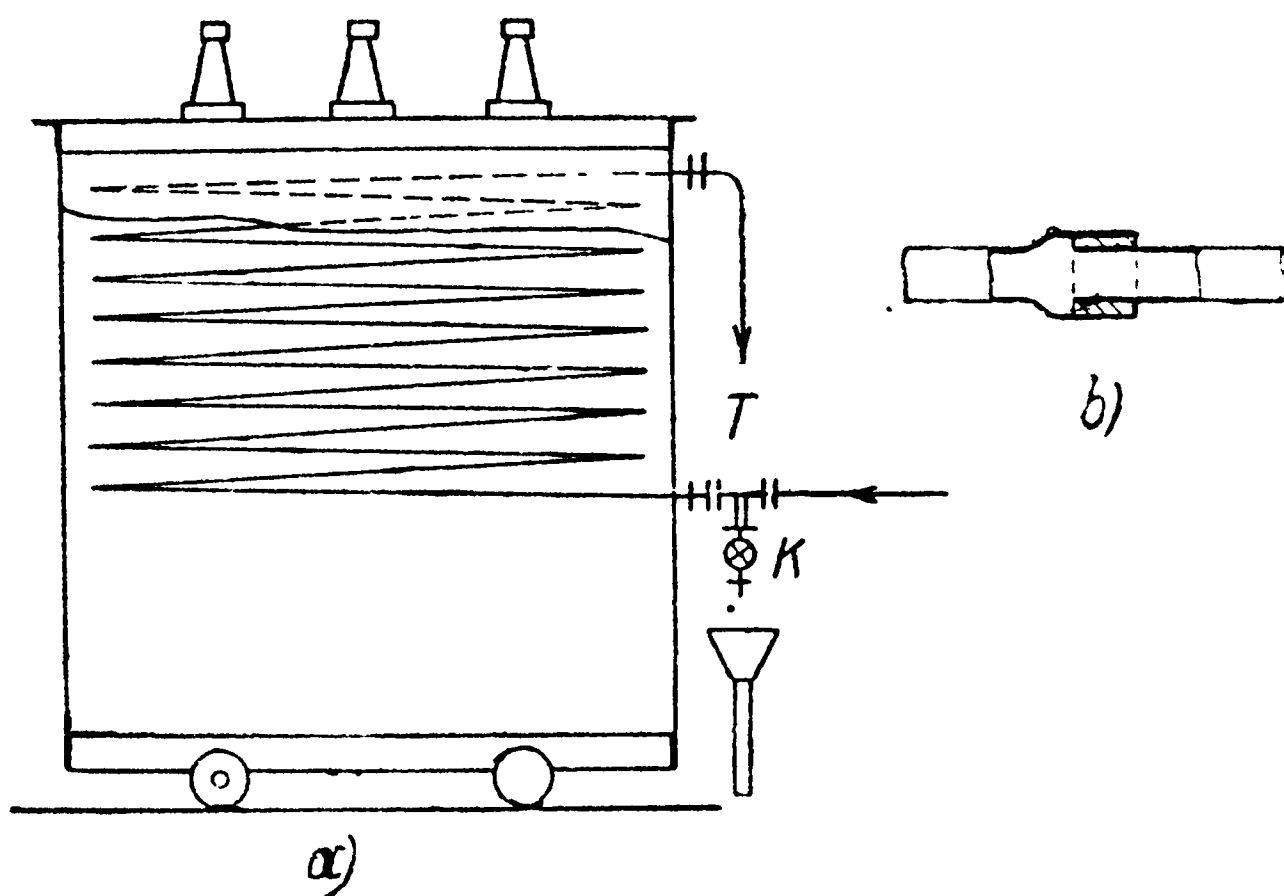


Рис. 184. Устройство внутреннего водяного охлаждения.

Вход воды в змеевик лучше делать снизу, для того чтобы она шла навстречу спускающемуся вдоль змеевика и охлаждающемуся маслу; при таком подведении воды, поставив тройник *T* и кран *K* (рис. 184 *a*), можно с удобством выпустить всю воду из змеевика в случае остановки трансформатора в зимнее время; кроме того, рекомендуется для надежности продуть змеевик с верхнего конца сжатым воздухом.

Эта система охлаждения весьма эффективна, трансформатор может быть построен с минимальными: размерами, весом и количеством масла. Однако присутствие внутри трансформатора змеевика с водой, давление которой больше давления масла, представляет слабую сторону этой системы, хотя змеевики делаются возможно более надежными и испытываются давлением в $10 \div 20$ ат; недостатком является довольно большой расход воды, которая должна быть вполне чистой.

Так или иначе, эта система охлаждения, раньше часто применявшаяся, теперь применяется очень редко, главным образом на гидростанциях.

Для отведения из трансформатора общих потерь P_{Σ} W при помощи воды, подогревающейся при этом на τ_v °C, необходимо количество воды:

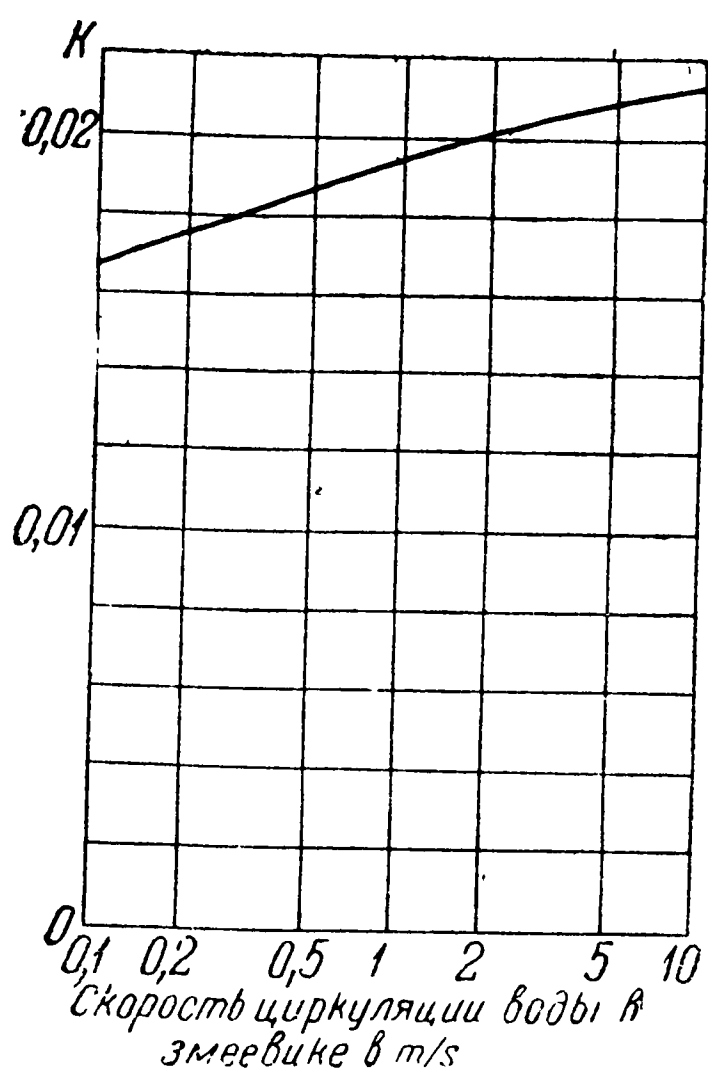


Рис. 185. Зависимость коэффициента K теплоотдачи внутреннего змеевика от скорости $v_{\text{вод}}$ воды.

$$Q_{\text{вод}} = \frac{P_{\Sigma}}{4180 \cdot \tau_v} \text{ литров в секунду или } \frac{P_{\Sigma} \cdot 60}{4180 \cdot \tau_v} \text{ литров в минуту.}$$

Считая P_{Σ} в киловаттах, на 1 kW потерь потребуется воды:

$$\frac{Q_{\text{вод}}}{P_{\Sigma}} = \frac{1000 \cdot 60}{4180 \cdot \tau_v} \approx \frac{15}{\tau_v}. \quad (204)$$

Так как обычно $\tau_v = 7 \div 10$ °C, то на 1 kW общих потерь трансформатора необходимо 1,5 ÷ 2 литра воды в минуту.

Ведя расчет по среднему перепаду температур (между средней температурой масла и средней температурой воды), учитывают суммарный перепад $\tau_{\text{III}} + \tau_{\text{IV}}$.¹ В этом случае имеет место теплообмен между двумя взаимодействующими жидкостями, разделенными металлической стенкой трубы. Теоретический коэффициент теплопередачи в этом случае равен:

$$K = \frac{1}{30 \left(\frac{1}{1 + 6 \sqrt{v_{\text{вод}}}} + \frac{1}{1 + 6 \sqrt{v_{\text{мас}}}} \right)} \frac{\text{Cal}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \quad [\text{Л. 6, стр. 334}], \quad (205)$$

где обе скорости $v_{\text{вод}}$ — воды и $v_{\text{мас}}$ — масла выражены в метрах в секунду.

Учитывая возможность некоторого загрязнения змеевика, а также пренебрегая ничтожной скоростью масла по сравнению со скоростью воды, считают:

$$K \approx \frac{1}{45 \left(\frac{1}{1 + 6 \sqrt{v_{\text{вод}}}} + 1 \right)} \frac{\text{Cal}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Кривая рис. 185 дает зависимость K от $v_{\text{вод}}$.

Обычно $v_{\text{вод}}$ лежит в пределах 1 ÷ 2 м/с. Тогда $K \approx 0,02$, и уравнение теплопередачи можно написать так:

$$P_{\Sigma} = 4180 \cdot 0,02 \cdot O_{\text{зм}} \cdot (\tau_{\text{III}} + \tau_{\text{IV}}) \text{ W.}$$

¹ Перепадом температуры в стенке трубы пренебрегают.

Здесь $O_{з.и}$ — поверхность змеевика в квадратных метрах. Отсюда:

$$O_{з.и} = \frac{P_{\Sigma}}{4180 \cdot 0,02 \cdot (\tau_{III} + \tau_{IV})} \approx 0,0125 \frac{P_{\Sigma}}{\tau_{III} + \tau_{IV}} \text{ м}^2,$$

а выражая P_{Σ} в киловаттах:

$$O_{з.и} = 12,5 \frac{P_{\Sigma}}{\tau_{III} + \tau_{IV}} \text{ м}^2. \quad (206)$$

По нормам АЕГ поверхность змеевика выбирается из расчета 0,6 м² на 1 kW общих потерь (при медной трубке Ø 38/41 mm).

Значит, в этом случае $\frac{12,5}{\tau_{III} + \tau_{IV}} = 0,6$, откуда $\tau_{III} + \tau_{IV} = 20,7^{\circ} \text{C}$.

Из примера видно преимущество этой системы охлаждения в смысле снижения температур. Действительно, для трансформаторов с естественным масляным охлаждением $\tau_{III} + \tau_{IV} \approx 4 + 40 = 44^{\circ} \text{C}$, т. е. вдвое больше. А так как:

$$\tau_{\text{м}} = \tau_I + \tau_{II} + \tau_{III} + \tau_{IV} + \frac{\tau_V}{2} \text{ (§ 80),}$$

то ясно, что уменьшение суммы $\tau_{III} + \tau_{IV}$ позволяет при заданном $\tau_{\text{м}}$ иметь большие величины τ_I и τ_{II} , т. е. форсировать загрузку обмоток, увеличивая плотность тока. Устройство змеевика см., например [Л. 24, табл. XIV — XV, XXII — XXIII, XXVII]. Ввиду сравнительно низкой температуры стенок бака, сам он в данном случае почти не отдает тепла окружающему воздуху.

§ 104. Расчет охладителей с принудительной циркуляцией масла

Охлаждение масла совершается путем циркуляции его через специальный охладитель. Этот последний может иметь, в свою очередь, одну из описанных выше систем охлаждения: а) с естественным воздушным охлаждением, б) с добавочным обдуванием, с) с водяным охлаждением.

а. Охладители с естественным воздушным охлаждением. Благодаря принудительной циркуляции масла через такой охладитель, разность между температурами масла вверху и внизу охладителя снижается до $5 \div 8^{\circ} \text{C}$ [Л. 20, стр. 223; Л. 31, стр. 587], и теплоотдача увеличивается в $1,5 \div 2,0$ раза по сравнению с таковой для бака с простой (тепловой) циркуляцией масла.

В зависимости от устройства охладителя удельная тепловая нагрузка его поверхности составляет:

Для ребристого охладителя	450 ÷ 550 W/m ²
„ трубчатого „	600 ÷ 700 „

Количество циркулирующего масла берется $10 \div 12$ литров в минуту на 1 kW потерь. Например, для трансформатора, мощностью 7500 kVA, 110/10 kV, у которого $P_{\Sigma} = 97,5 \text{ kW}$, поставлен насос на 1200 литров масла в минуту с мотором 6,5 kW, 1450 обо-

ротов в минуту. Рис. 186 изображает охлаждающую установку этого трансформатора. Охладитель состоит из $4 \times 4 \times 20 = 320$ тру-

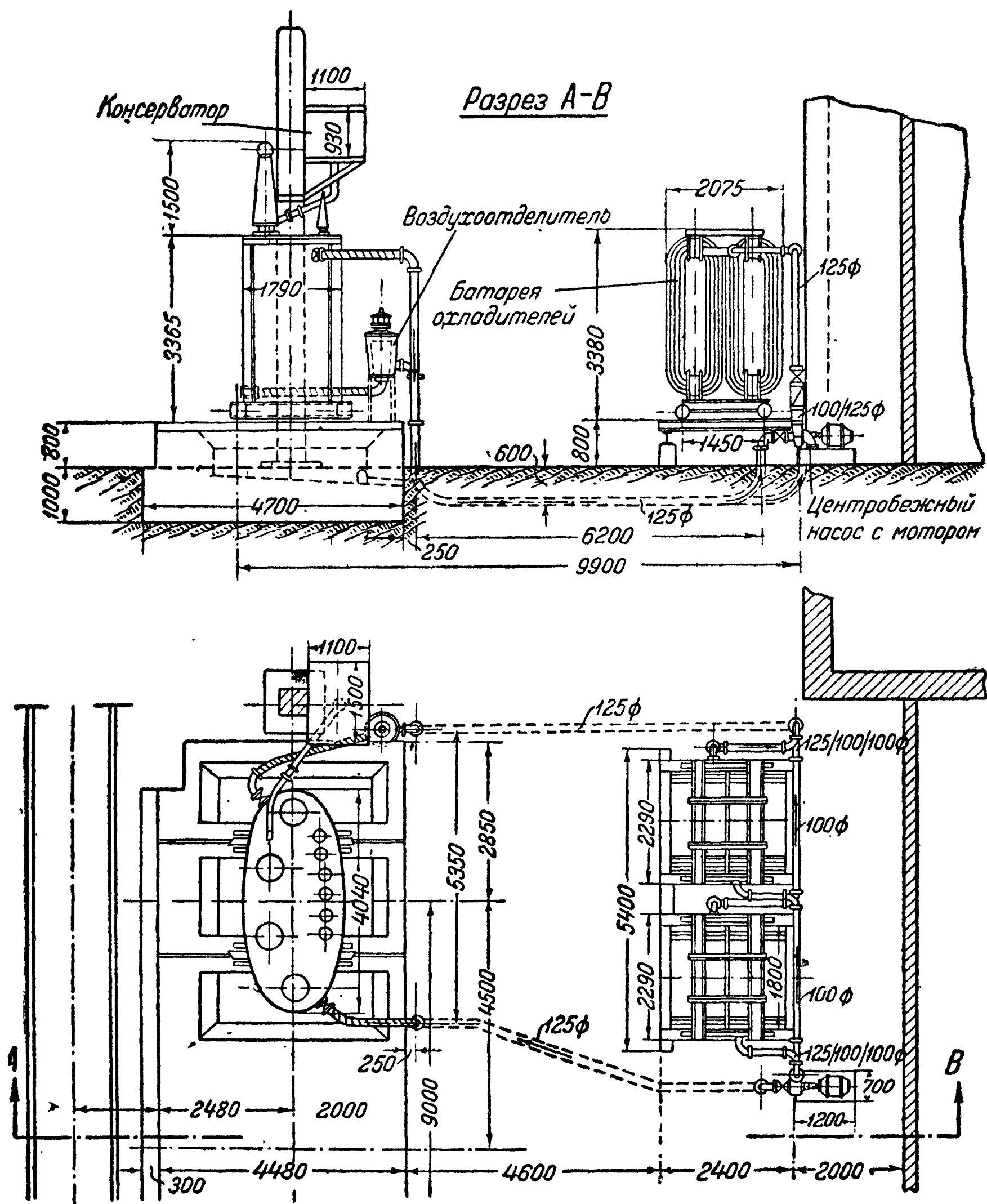


Рис. 186. Охлаждающая установка трансформатора AEG 7500 kVA, 110 kV с принудительной циркуляцией масла через охладитель с естественным воздушным охлаждением.

бок, диаметром 50 mm и средней длиной 2,6 m каждая; это дает в сумме 257 m² поверхности охлаждения.

в. Охладители с добавочным обдуванием. Как было указано в § 102, добавочным обдуванием бака можно легко увеличить его теплоотдачу вдвое. Этот же принцип применяется и для охлади-

телей. На рис. 187 изображен трансформатор ВВС 32500 кВА, 10,5/48/116/145 кВ с охладителями с принудительной циркуляцией масла и добавочным обдуванием.

с. Охладители с водяным охлаждением масла. Эти устройства применяются теперь почти исключительно в виде трубчатых

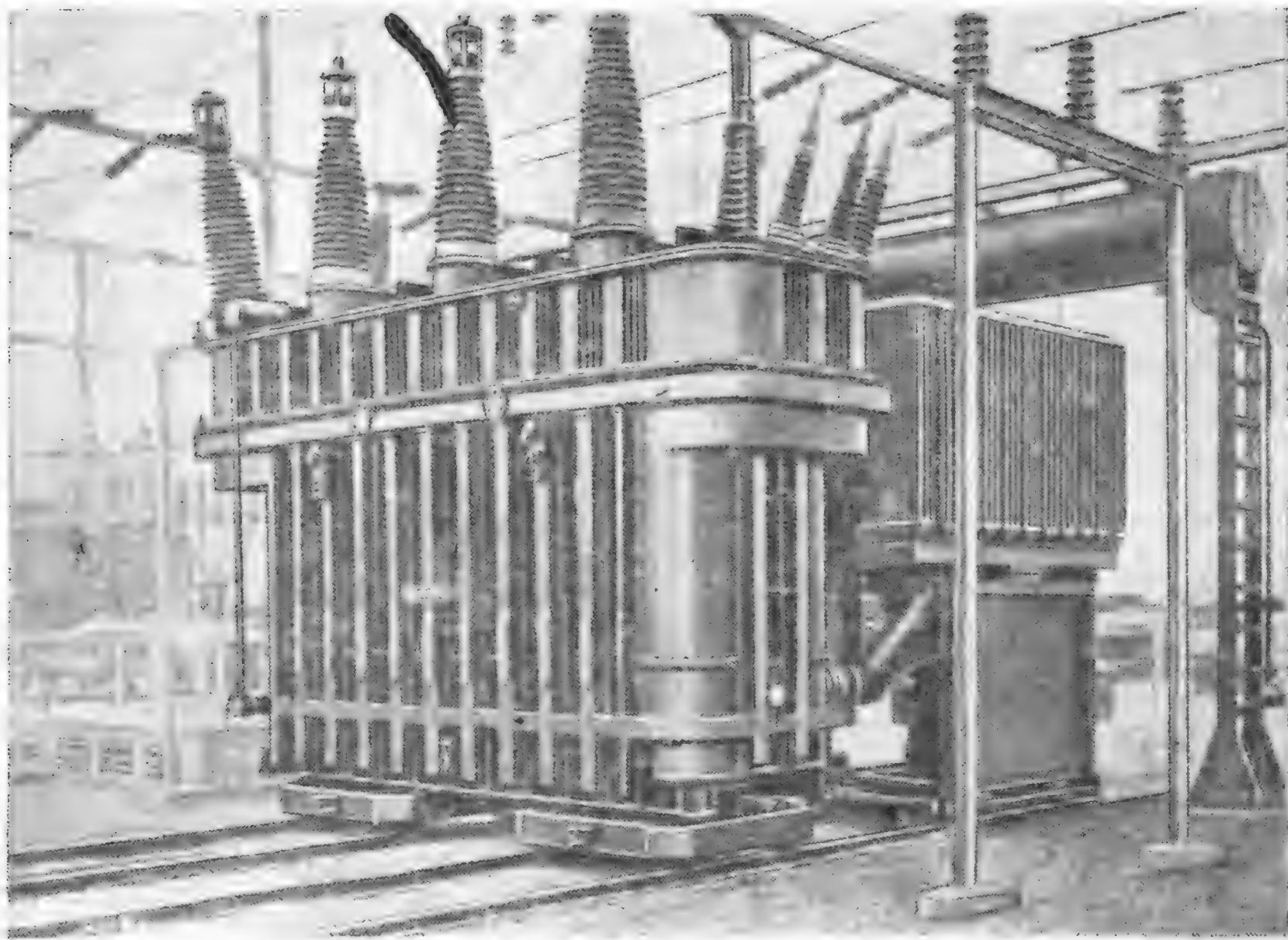


Рис. 187. Трансформатор с принудительной циркуляцией масла через охладитель с добавочным обдуванием.

охладителей, работающих по принципу противотока (рис. 188). В трубках циркулирует вода, а вокруг них — масло, принуждае-

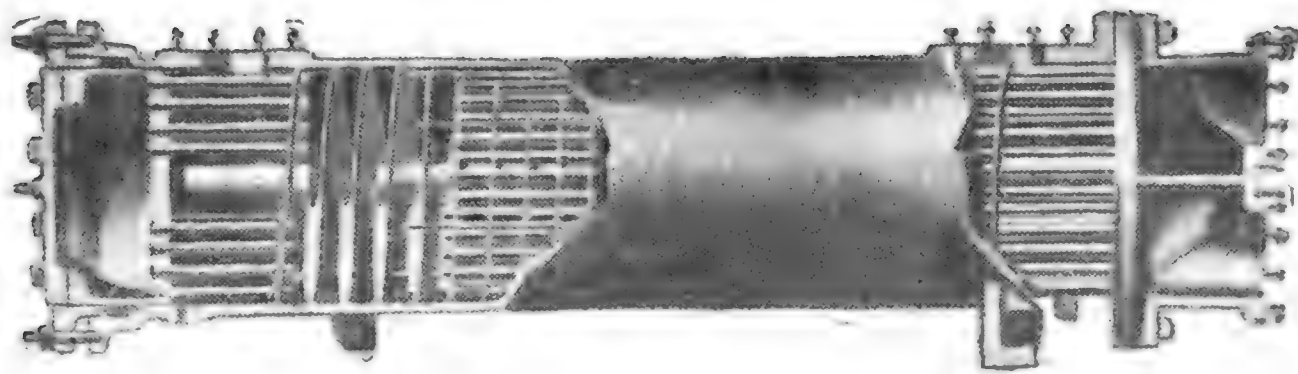


Рис. 188. Трубчатый охладитель для масла.

мое к циркуляции по винтовой линии, перпендикулярно водяным трубкам. При этом предпочитают, чтобы распределение давлений воды и масла соответствовало примерно диаграмме рис. 189, т. е. чтобы во всех точках давление масла было больше давления воды; если бы давление воды изобразилось пунктирной линией, то в части охладителя, соответствующей заштрихованной

Т а б л и ц а 42

Потери трансформатора kW	Поверхность охладителя m ²	Количество (в литрах в минуту) циркулирующих		Диаметр соединительных труб mm	Вес масла в охладителе kG
		масла	воды		
31÷ 50	9	300	46÷ 75	70	575
51÷ 65	12	400	76÷ 98	70	600
66÷ 80	12	500	99÷ 120	80	700
81÷ 95	18	600	121÷144	80	750
96÷125	24	800	145÷180	100	900
126÷160	30	1000	181÷240	125	1150
161÷190	45	1200	241÷285	125	1250
191÷230	45	1500	286÷345	150	1600
231÷260	60	2000	346÷390	150	1650
261÷320	60	3000	391÷480	200	1900

части диаграммы, был бы возможен прорыв воды в масло, влекущий за собой немедленную порчу трансформатора.

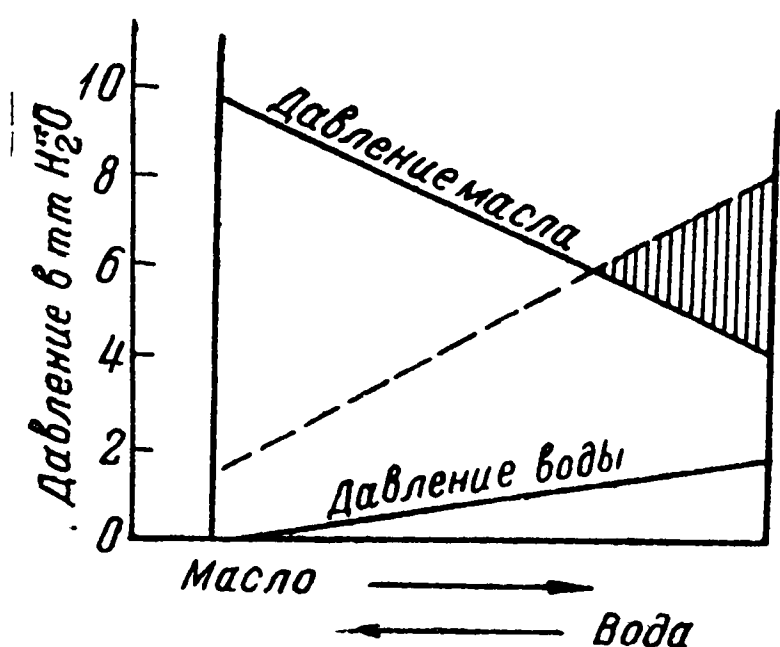


Рис. 189. Диаграмма давлений масла и воды в трубчатом охладителе для масла.

В табл. 42 приведены данные охладителей подобного типа; при температуре входящей воды в 25° С разность температур масла составляет 35 ÷ 40° С.

При всех системах циркуляционного охлаждения обязательна установка на трубопроводе между охладителем и трансформатором специального отделителя для воздуха, который может быть присосан через неплотности сальников центробежного насоса; пузырьки воздуха, попавшие в трансформатор, могут повести к пробоям и к ложному

действию газового реле (воздухоотделитель см. на рис. 186).

Г Л А В А XII

МЕХАНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ДЕТАЛЕЙ ТРАНСФОРМАТОРОВ

§ 105. Механические силы, действующие при коротких замыканиях

Обычно учитывают лишь действия внешних коротких замыканий, т. е. происходящих во вторичной сети трансформатора, во вне его, но в непосредственной от него близости и при условии, что на его первичных зажимах будет все время поддерживаться постоянное напряжение. В момент максимума тока короткого замыкания (первый или второй полупериод) на обмотки действуют наибольшие механические силы. Эти силы имеют

характер ударов с частотой, равной двойной частоте сети, и постепенно уменьшаются по мере того как ток принимает значение тока длительного короткого замыкания. В момент прохождения тока через нуль упруго деформированные обмотки оказывают обратную механическую реакцию.

При вполне симметричных обмотках силы, проявляющиеся при коротком замыкании, имеют следующие максимальные значения.

1. Сила F , отталкивающая одну обмотку от другой и равно-

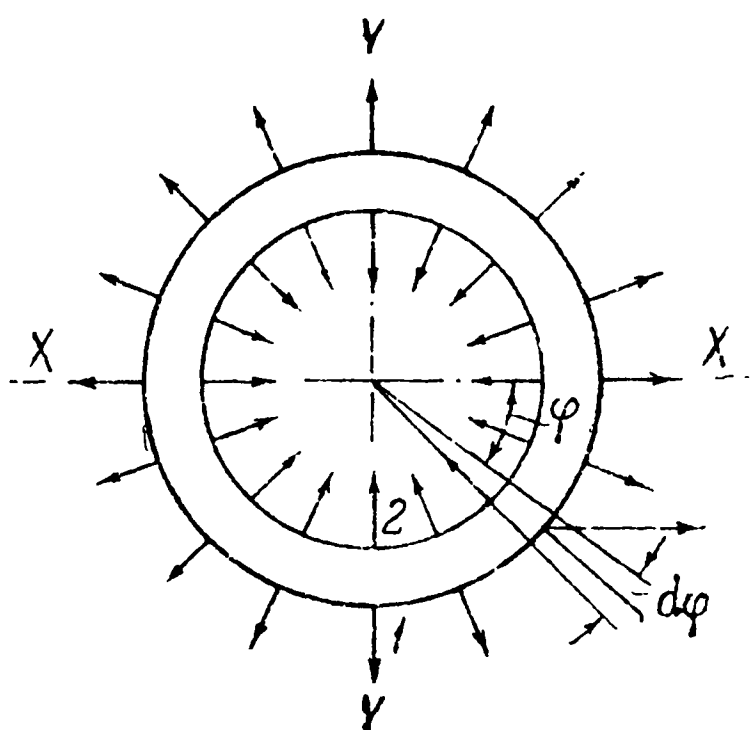


Рис. 190. Радиальные силы, действующие на concentрические обмотки.

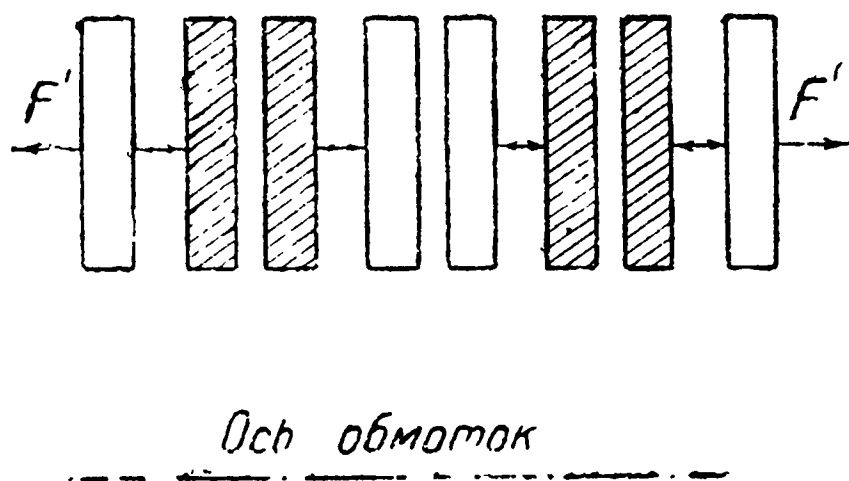


Рис. 191. Силы, действующие на чередующиеся обмотки.

мерно приложенная по поверхностям обмоток, обращенным друг к другу, причем:

для обмоток concentрических — это совокупность радиальных сил (рис. 190), равная:

$$F = 12,8 \left(\frac{I_{\phi} \cdot w}{e_k} \right)^2 \cdot \frac{w}{L} \cdot K_R \cdot x^2 \cdot 10^{-4} \text{ kG}; \quad (207)$$

для обмоток чередующихся — это совокупность сил, действующих вдоль оси катушек (рис. 191), причем каждая сила равна:

$$F' = \frac{12,8}{2p} \cdot \left(\frac{I_{\phi} \cdot w}{e_k} \right)^2 \cdot \frac{l_w}{L} \cdot K_{R1} \cdot x^2 \cdot 10^{-4} \text{ kG}, \quad (208)$$

где p — число полных групп одной из чередующихся обмоток.

В этих и в дальнейших формулах $x = f \left(\frac{e_s}{e_r} \right)$ и берется по кривым рис. 192; x указывает, во сколько раз первый максимум тока короткого замыкания превышает амплитуду тока длительного короткого замыкания.

2. Силы, сжимающие каждую из обмоток, равны: для concentрических обмоток — сила, действующая вдоль оси (рис. 193 а):

$$F_a = - \frac{\delta_s}{2L} F \text{ kG}; \quad (209)$$

для чередующихся обмоток — радиальные силы, причем на каждую катушку приходится сила:

$$F_r' = \frac{F}{p \cdot p'} \cdot \frac{\delta_s}{L} \text{ kG}, \quad (210)$$

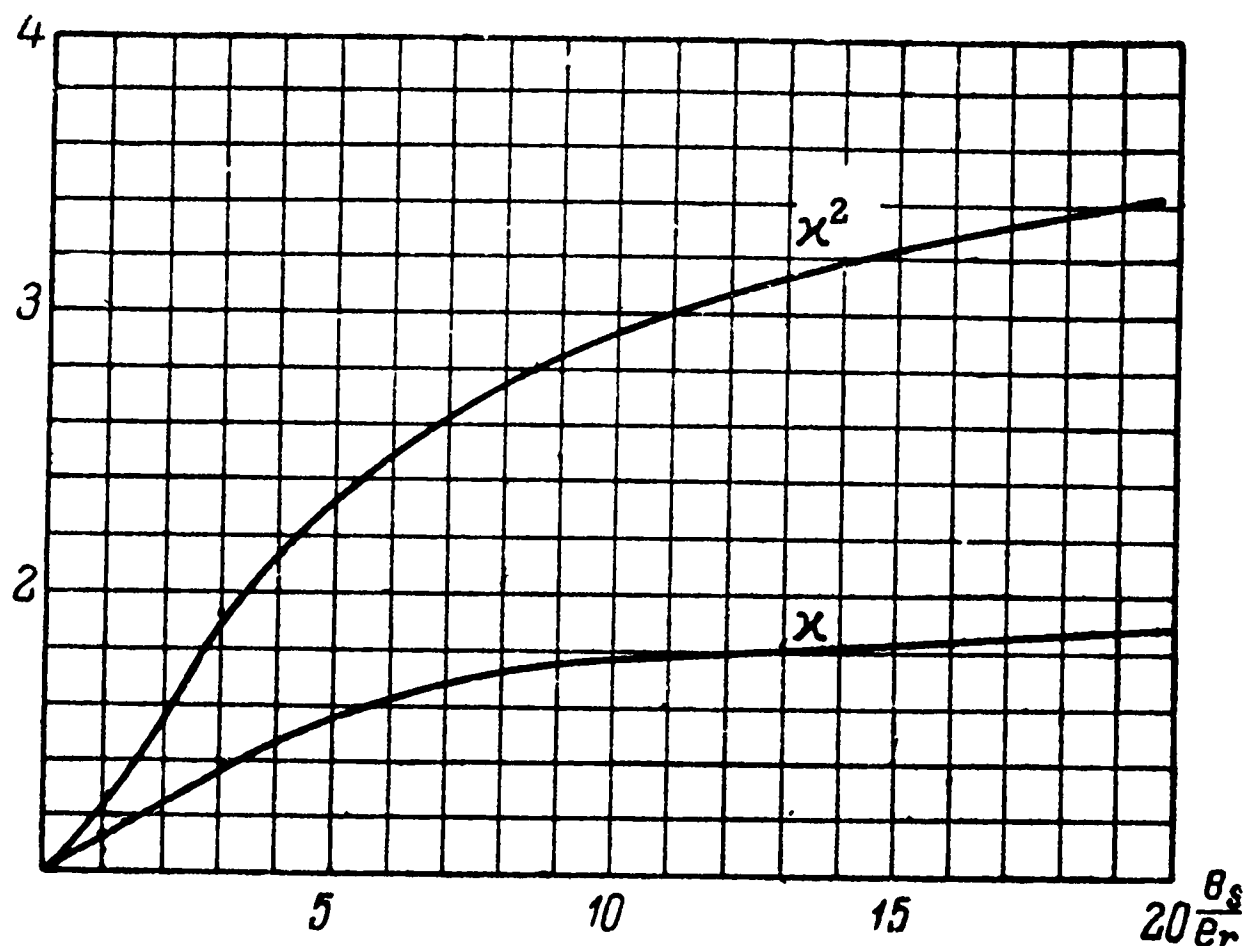


Рис. 192. Отношение χ максимальной возможной амплитуды тока короткого замыкания к амплитуде тока длительного короткого замыкания в зависимости от e_s/e_r трансформатора и кривая $\chi^2 = f(e_s/e_r)$.

где p' — число катушек в группе (рис. 193 б).

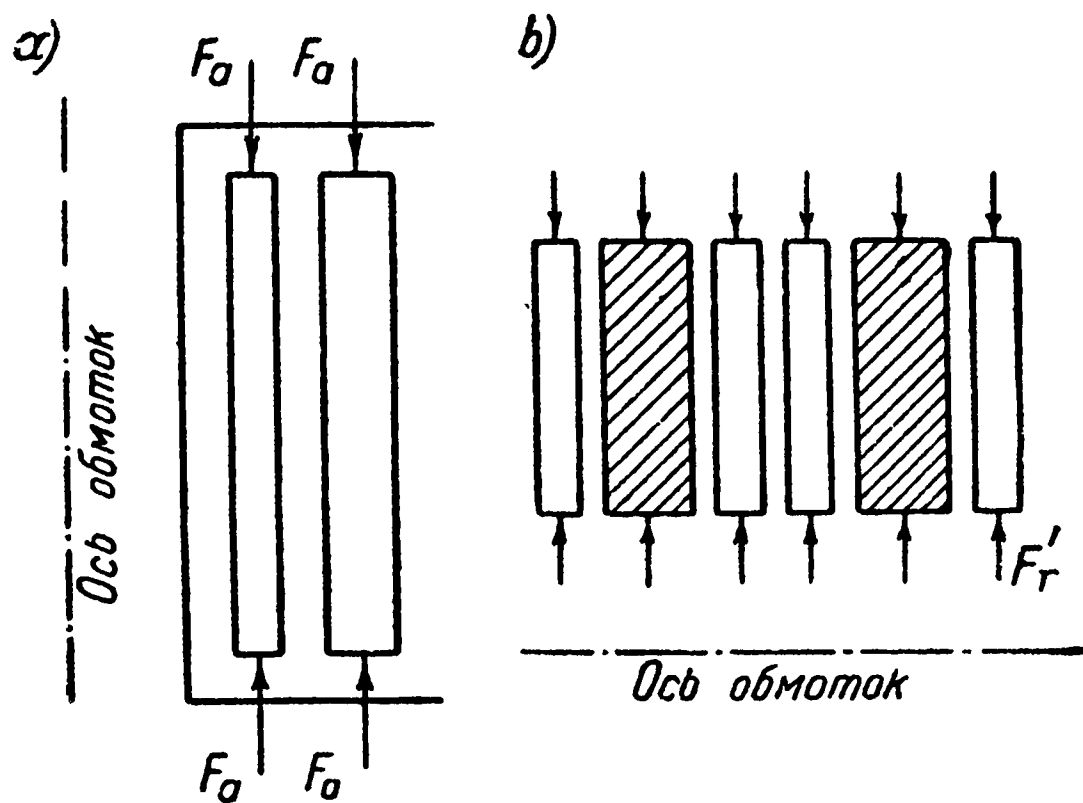


Рис. 193. Силы, сжимающие каждую из обмоток: а — для обмоток цилиндрических; б — для дисковых.

При несимметричных обмотках проявляются еще добавочные силы, в зависимости от наличия той или иной несимметрии в обмотках.

Если, например, при наличии ответвления в одной из обмоток выключается $\chi\%$ витков в середине (рис. 194 а) или по концам (рис. 194 б), то проявляется добавочная сила:

$$F_x' \approx \frac{1}{80} F \cdot \chi \text{ kG}. \quad (211)$$

Эта сила будет или складываться, или вычитаться из силы F_a (формула 209); иногда может наступить равновесие, определяющееся равенством:

$$\frac{\chi}{80} = \frac{\delta_s}{2L}. \quad (212)$$

Этим соображением иногда пользуются при конструировании обмоток. При выключении $x\%$ витков с конца (рис. 194 с) добавочная сила F_x будет примерно в 4 раза больше, чем в случаях

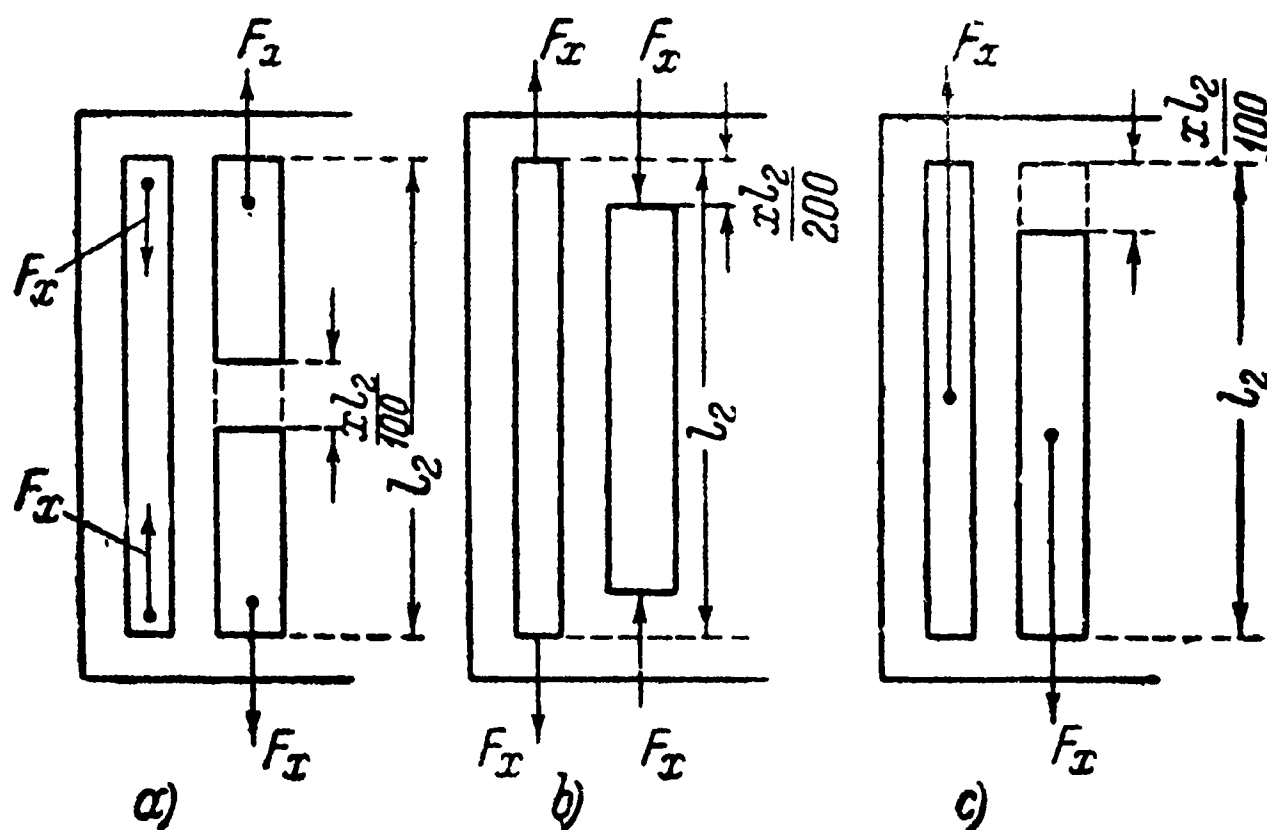


Рис. 194. Добавочные силы от действия несимметричности обмоток.

рис. 194 а и б. Вышеприведенные формулы являются упрощенными. Точный анализ явлений см. [Л. 1, гл. 11; Л. 175—179].

§ 106. Действие механических сил на обмотки трансформаторов

Силы, упомянутые в § 105, стремятся прежде всего деформировать сами обмотки, к которым они приложены.

1. При концентрических обмотках (рис. 190) внешняя обмотка (1) подвергается растяжению радиальными силами подобно всякому цилиндру с внутренним давлением. Поскольку сила F (формула 207) приложена по всей поверхности цилиндра обмотки (1), на элемент витка, соответствующий углу $d\varphi$ (рис. 190), действует радиальная сила:

$$dF = \frac{F \cdot R_1 \cdot d\varphi}{w_1 \cdot 2\pi \cdot R_1} = \frac{F \cdot d\varphi}{w_1 \cdot 2\pi}.$$

Если предположить, что обмотка разорвется по плоскости $Y—Y$, то разрыв в двух местах произведет сумма слагающих всех сил dF в направлении оси $X—X$, т. е. общая разрывающая сила на один виток будет равна:

$$F_{X-X} = \frac{F}{2 \cdot 2\pi \cdot w_1} \int_0^\pi \sin \varphi d\varphi = \frac{F}{2\pi \cdot w_1} \text{ кГ.}$$

Она вызовет механическое напряжение σ_1 в витке, причем:

$$\sigma_1 = \frac{F \cdot 100}{2\pi \cdot w_1 \cdot S_{m1}} \text{ кГ/см}^2, \quad (213)$$

если сечение витка S_{m1} брать в кв. миллиметрах.

Так как сила имеет ударный характер (§ 105), и на внутренние витки обмотки действуют двойные силы — индукция B_s потоков рассеяния для внутренних витков имеет двойное против среднего значение (рис. 77а), — то σ_1 не допускают больше 600 kG/cm².

Таким образом, сила F в данном случае воспринимается непосредственно самим материалом витков обмотки, не нуждающейся в каких-либо специальных укреплениях. Однако следует указать, что условие $\sigma_1 \leq 600$ kG/cm² лимитирует предельную мощность трансформаторов данного типа; действительно, не трудно вывести [Л. 25, стр. 446], что сила F пропорциональна мощности трансформатора.

Затем необходимо учесть, что хотя на наружные витки кату-

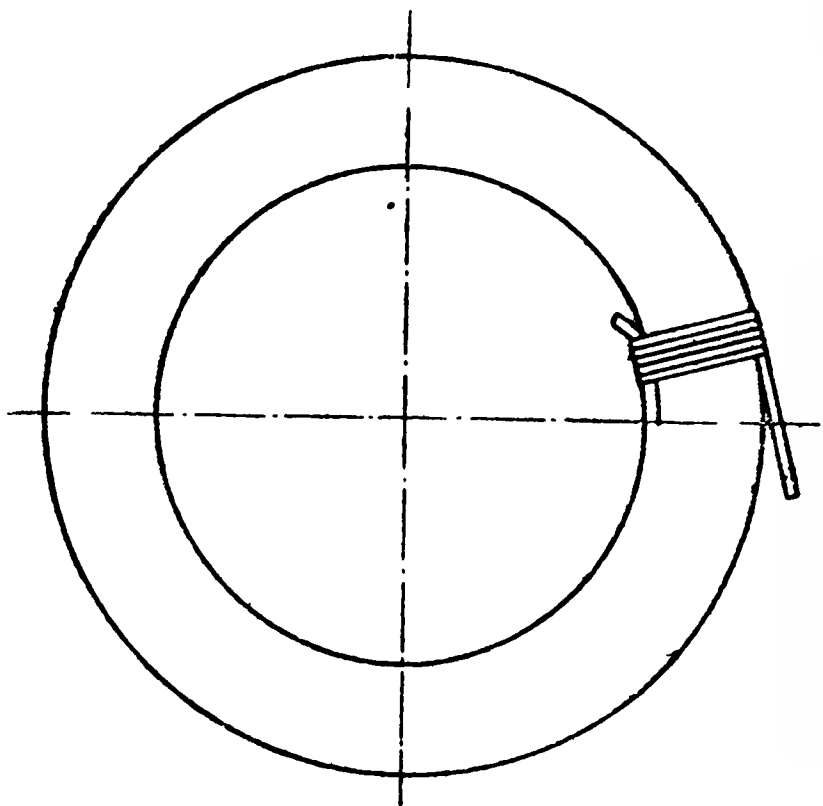


Рис. 195. Укрепление концов дисковой катушки.

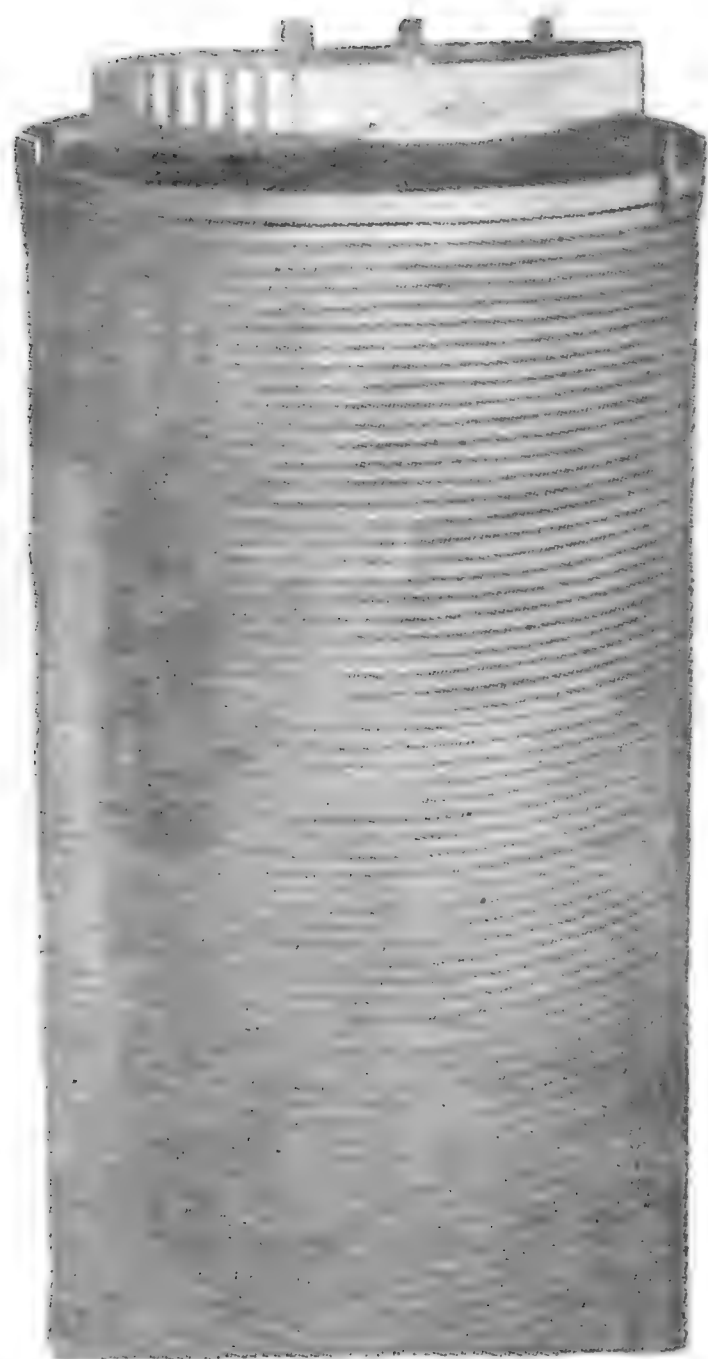


Рис. 196. Внутренняя обмотка трехфазного трансформатора 7500 kVA, 35/6 kV, смятая радиальными силами.

шек обмотки (1) действуют весьма небольшие силы, однако всегда эти витки стараются укрепить надежными бандажами из шпагата (рис. 195). При непрерывной обмотке (§ 48) это является излишним, в чем заключается одно из ее преимуществ.

2. Внутренняя обмотка (2) рис. 190 при этом подвергается такой же по величине, но сжимающей силе F . Эта сила в конечном счете должна быть передана стержню трансформатора, для чего обмотка (2) должна быть надежно расклинена изнутри. Рис. 196 показывает результат действия такой сжимающей силы на внутреннюю, недостаточно расклиненную обмотку трехфазного трансформатора 7500 kVA, 35/6 kV.

3. Осевые силы $F_a \pm F_x$ производят взаимный сдвиг и сжатие



Рис. 197. Разрушение концов обмоток осевыми силами.

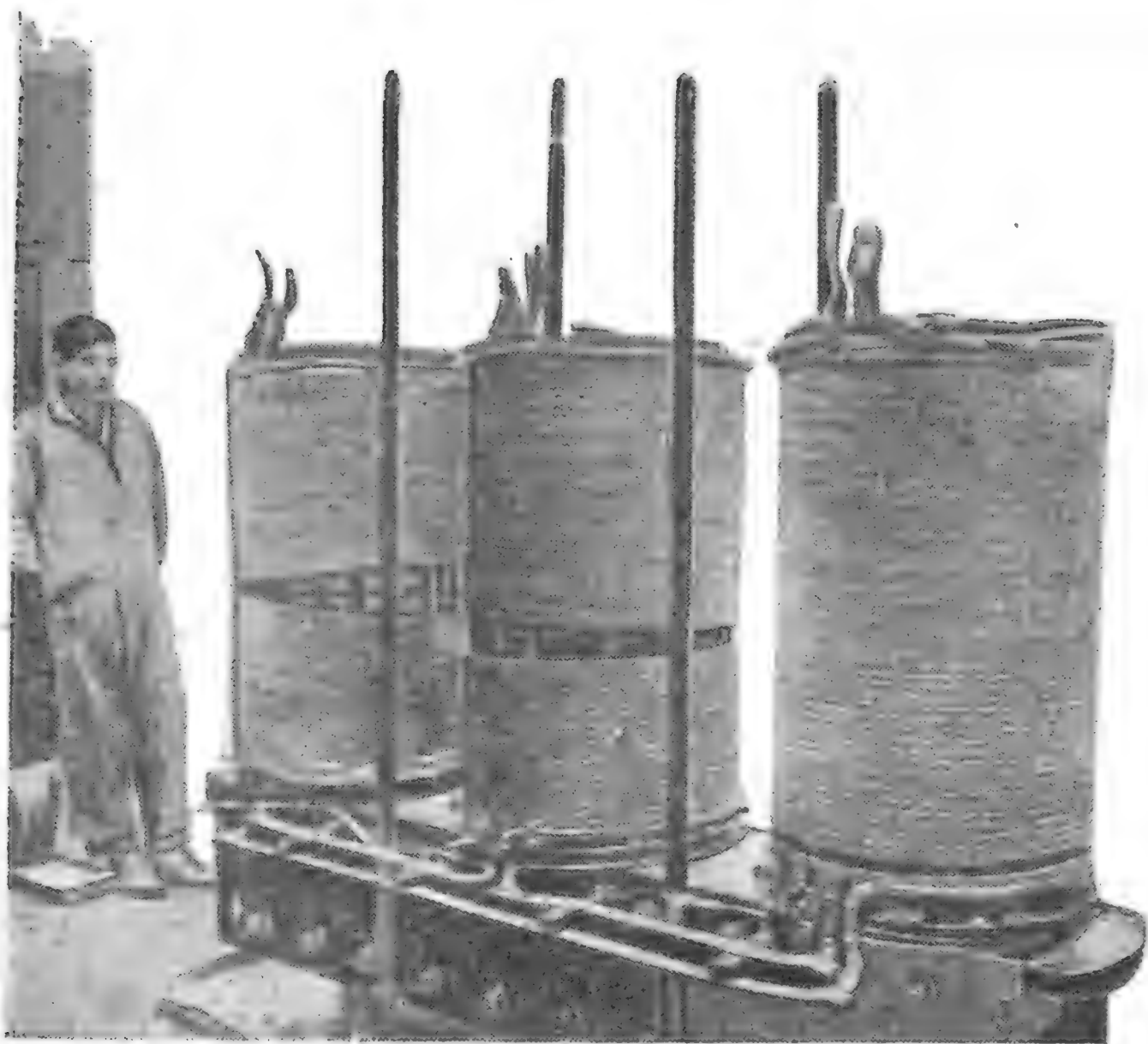


Рис. 198. Обмотки низшего напряжения трансформатора 7500 кВА, 35/6 кВ, разорванные осевыми силами.

обмоток. Хотя эти силы, даже в случае их арифметического сложения, все же в несколько раз меньше силы F (формула 107), однако осевое их направление чрезвычайно неблагоприятно для цилиндрических катушек.

Такие катушки, с обычно небольшим радиальным размером, имеют сами по себе совершенно недостаточную прочность в осевом направлении; крайние витки их сминаются и раздавливаются об опоры (рис. 197), вследствие чего теперь для сред-

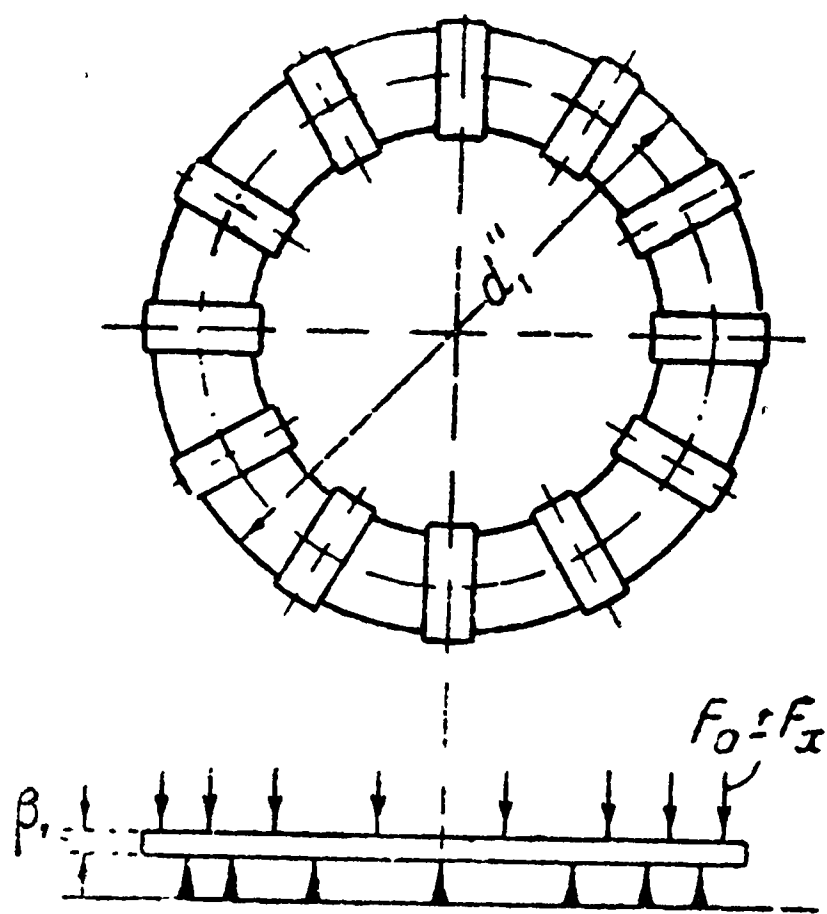


Рис. 199. Действие осевых сил на дисковую катушку, лежащую на опорах.

ним и мощных трансформаторов (свыше 300 kVA) применяются винтовые обмотки (§ 49), имеющие значительно больший радиальный размер. Действие осевых усилий, разорвавших обмотки (2), изображено на рис. 198. Это — трехфазный трансформатор 7500 kVA, 35/6 kV, у которого во время работы осела обмотка (1) и расположилась по рис. 194 с, после чего произошло короткое замыкание.

Таким образом, цилиндрические обмотки, вообще говоря, не могут сами сопротивляться осевым усилиям и должны быть соответственно укреплены, как указано ниже.

4. Так как крайние витки или крайние дисковые катушки, из которых состоит цилиндрическая обмотка (рис. 193—194), подвер-

гаются силам $F_a \pm F_x$, то на эту силу должна быть рассчитана прочность самих катушек и опор, на которые опираются катушки. Дисковую катушку, лежащую на опорах (рис. 199), можно рассматривать как балку на многих опорах, нагруженную равномерно распределенной нагрузкой. Однако практически просто выбирают число n опор так, чтобы расстояния между их центрами, считая по наружному диаметру d_1'' катушек, при круглом проводе не превосходили $80 \div 120$ mm. При прямоугольном проводе n может быть определено в зависимости от осевого размера β_1 провода и от d_1'' по формуле:

$$n = \frac{d_1''}{20 \cdot \sqrt{\beta_1}}, \quad (214)$$

где d_1'' и β_1 — в миллиметрах. n должно быть числом четным; наименьшее число опор — 4. Площадь опор проверяется на удельное давление, которое при действии силы $F_a \pm F_x$ не должно превышать $100 \div 120$ kG/cm².

5. Для того чтобы каждая из дисковых катушек могла пере-

давать действующее на нее осевое усилие непосредственно опоре, а не через толщу всех прочих катушек, применяют так называемые „разгруженные обмотки“. Разгрузка достигается тем, что усилия от каждой катушки передаются опорам (рис. 64) деталями из гетинакса и т. п. непосредственно, а не через прочие катушки. Две последние конструкции весьма пригодны для многорядных дисковых катушек из круглого провода, наиболее чувствительных к раздавливанию осевыми силами.

Однако нельзя не отметить, что все конструкции с разгрузкой

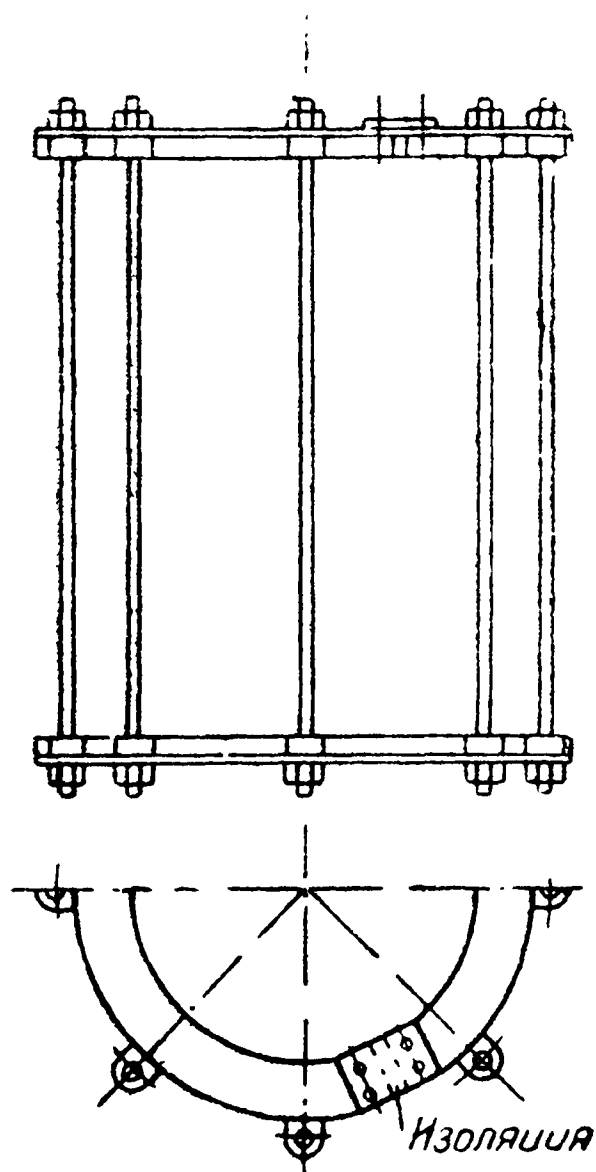


Рис. 200. Укрепление обмотки стяжными шпильками и разрезными стальными кольцами.

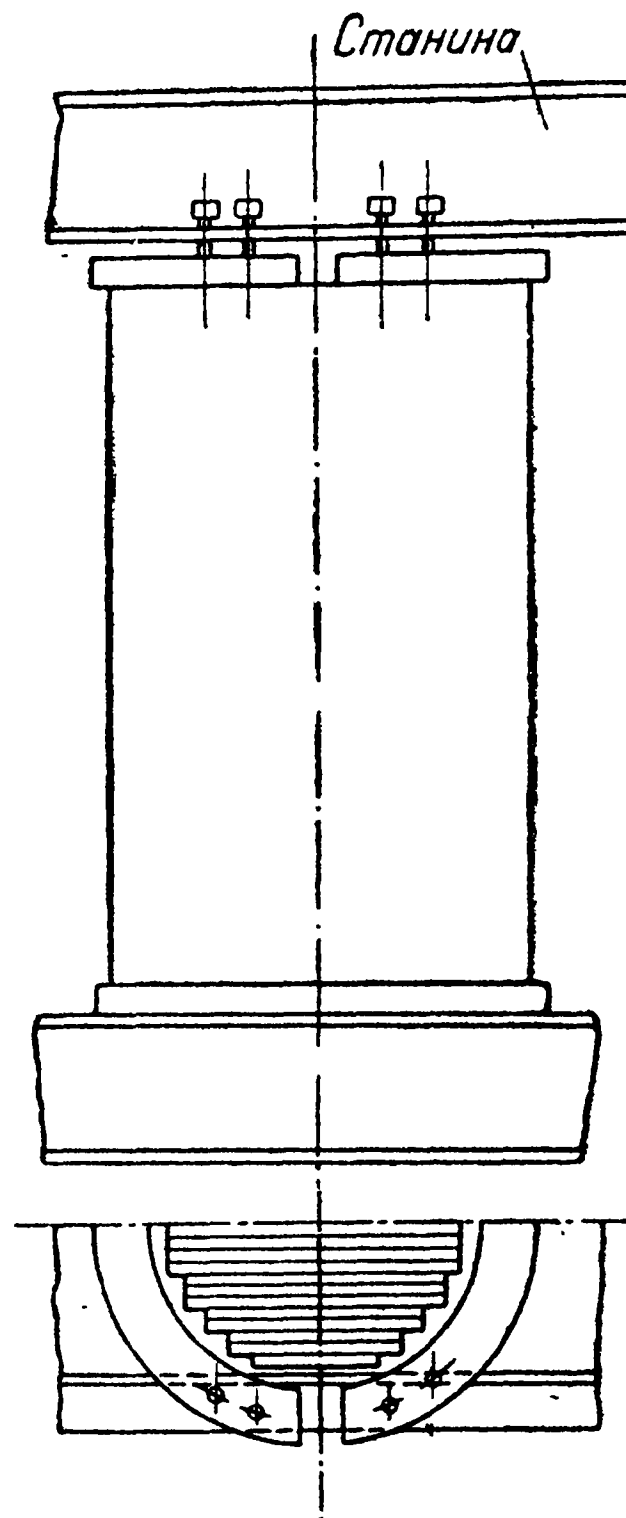


Рис. 201. Укрепление обмотки разрезным кольцом и нажимными болтами.

обмотки в значительной степени ее удорожают и основаны на нежелательном применении бакелизованных деталей. В СССР такие конструкции не привились.

6. Осевые силы $F_a \pm F_x$, воспринятые опорами, могут быть или переданы дальше станине и сердечнику трансформатора или же станина и сердечник могут быть вовсе освобождены от действия этих сил, благодаря применению массивных разрезных колец и стяжных шпилек (рис. 200).

В первом случае силы могут передаваться станине непосредственно опорами (см. чертежи I, II и III в приложении) или же в верхней части станины специальными разрезными кольцами

и нажимными болтами (рис. 201). Применение нажимных болтов позволяет подтягивать обмотку, усаживающуюся с течением времени под действием температуры и масла. Поскольку бакелизованные детали мало усаживаются, разгруженные обмотки (рис. 64) можно считать практически неусаживающимися. Но, строго говоря, все обмотки усаживаются, а частое их подтягивание невозможно. Задачу о равномерном и постоянном нажатии на обмотку в не-

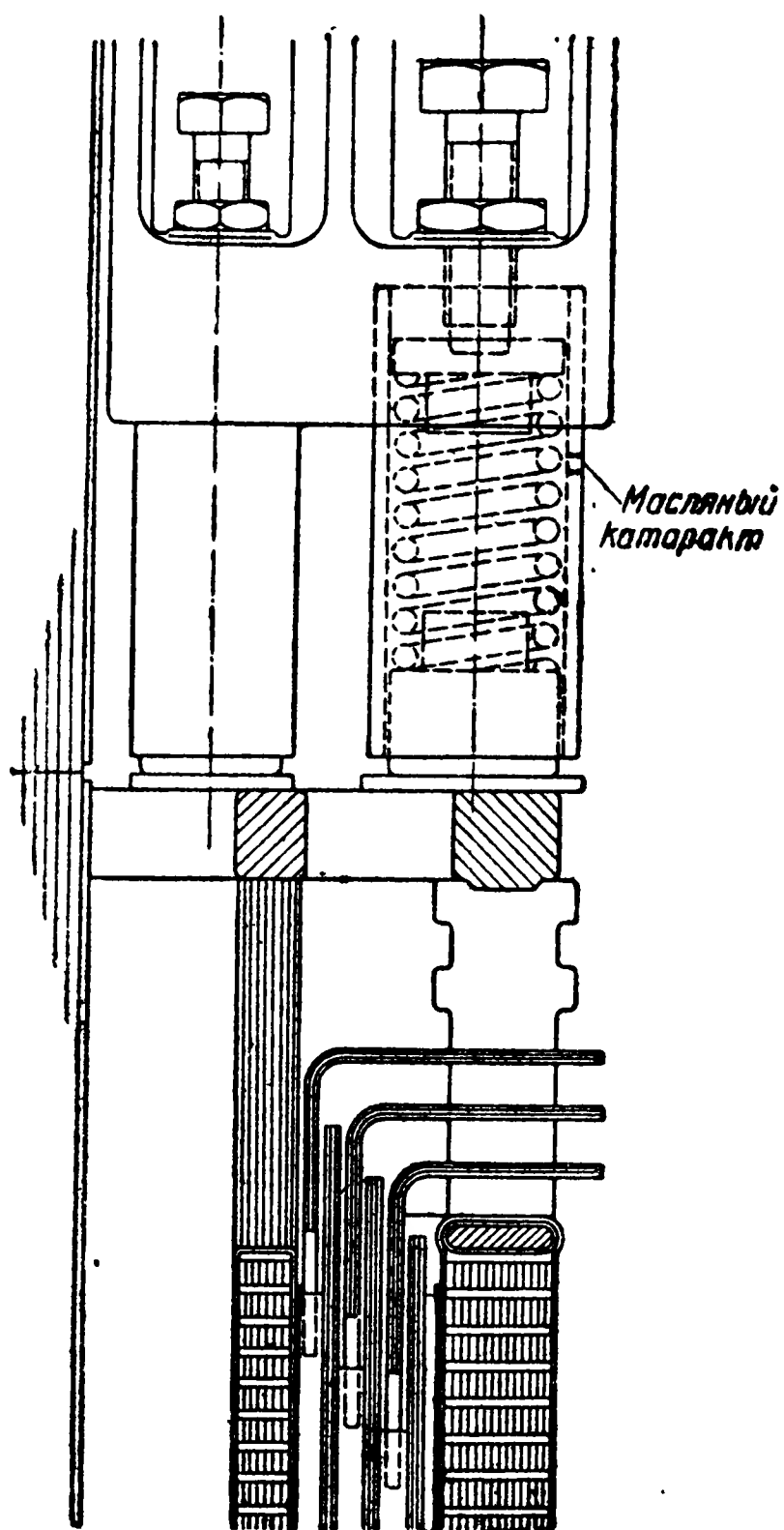


Рис. 202. Пружинная опора для обмотки.

которых случаях решают применением разного рода пружин, имеющих иногда масляные катаракты (рис. 202). [Л. 11а, рис. 232). При медленной усадке обмотки пружины, медленно подаваясь, продолжают равномерно давить на обмотку, при быстрых же ударах сил от короткого замыкания действует амортизация масляного катаракта.

7. Для трансформаторов с чередующимися обмотками общая сила отталкивания одной обмотки от другой распределяется

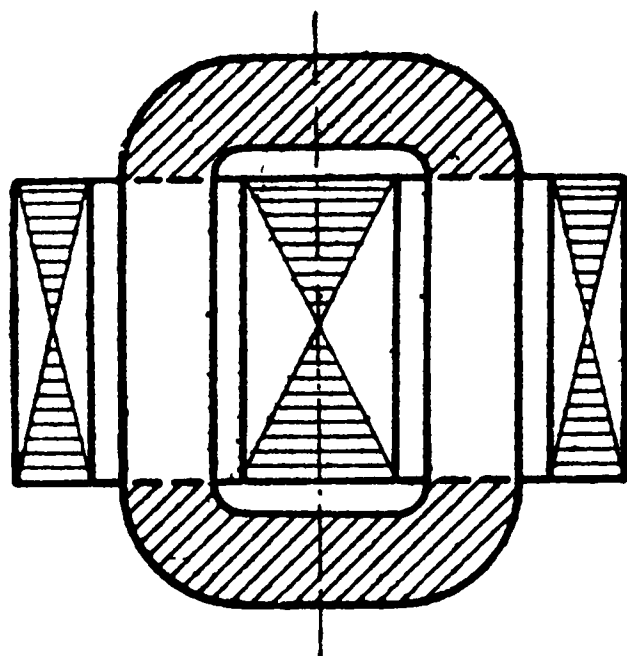
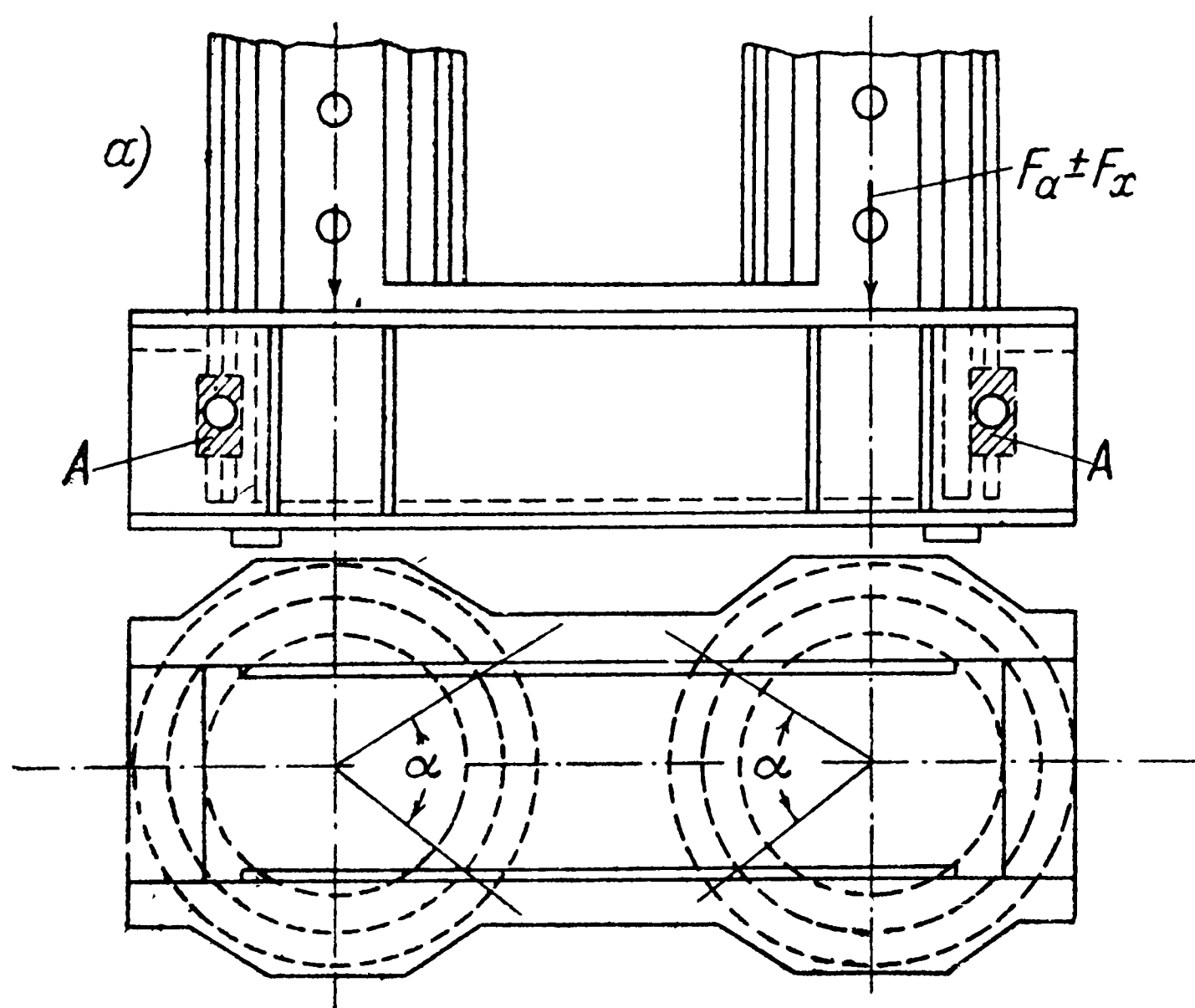


Рис. 203. Части крайних катушек броневых трансформатора, подлежащие особому укреплению (на рисунке заштрихованы).

по всем $2p$ поверхностям групп катушек (рис. 191), и на каждую поверхность будет действовать лишь сила F' (формула 208). При вполне симметричной обмотке каждая группа катушек сжимается с торцов силами F' и находится в равновесии; зато крайние катушки целиком подвергаются действию таких сил, отрывающих от остальных катушек внешние части крайних катушек (на рис. 203 — броневой трансформатор — эти части заштрихованы). Если сердечник собран внахлестку, он может удерживать средние части катушек, но при сборке впритык приходится применять сильные скрепления из уголков, швеллеров и тяг.

8. Дисковые катушки чередующихся обмоток с выключенными витками подвергаются сжимающим и сдвигающим силам в плос-



кости катушек в соответствии с рис. 193б.

9. Катушки прямоугольной формы, кроме вышеназванных сил, подвергаются еще добавочным деформирующим силам; подробно см. [Л. 1, стр. 324—326]. Поэтому предпочитают применять катушки круглой формы.

§ 107. Механические расчеты других деталей трансформаторов; детали баков

При отсутствии стяжных шпилек, указанных на рис. 200, осевые силы $F_a \pm F_x$ будут передаваться опорами обмотки станине и сердечнику трансформатора. Силы распределятся в зависи-

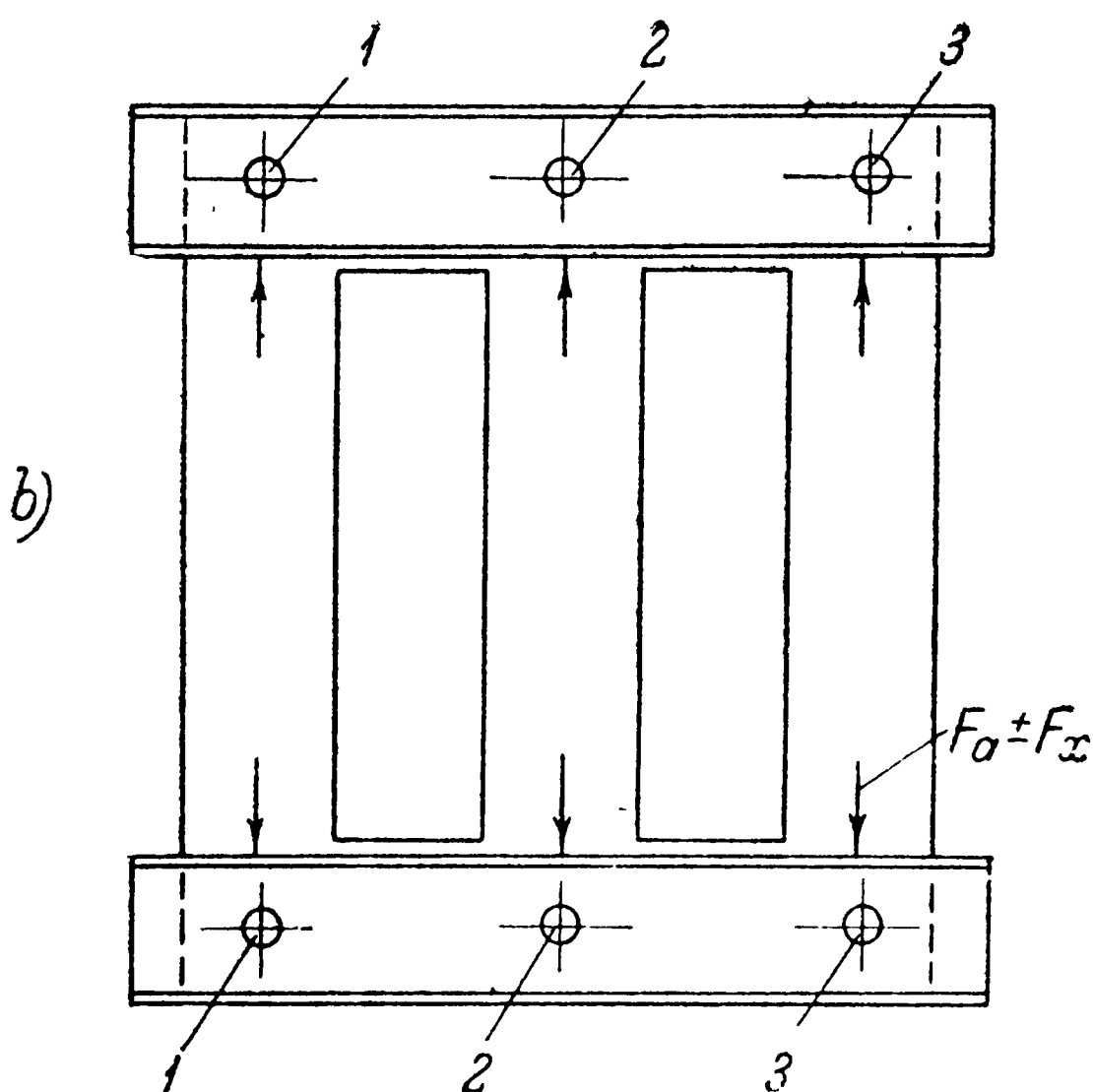


Рис. 204. Передача осевых усилий телу сердечника: а — через посредство крепящих брусьев; б — через посредство стяжных шпилек

мости от угла α охвата (рис. 204а). У однофазных трансформаторов действуют непосредственно на сердечник по 0,2 осевых сил каждого стержня, а на обе балки станины по 0,4 этих сил; у трехфазных трансформаторов (рис. 204б) от среднего стержня действует на сердечник около 0,4 осевых сил, а на каждую из балок станины по 0,3 этих сил. Каждая из балок должна быть рассчитана на действие приходящихся на нее усилий. При этом

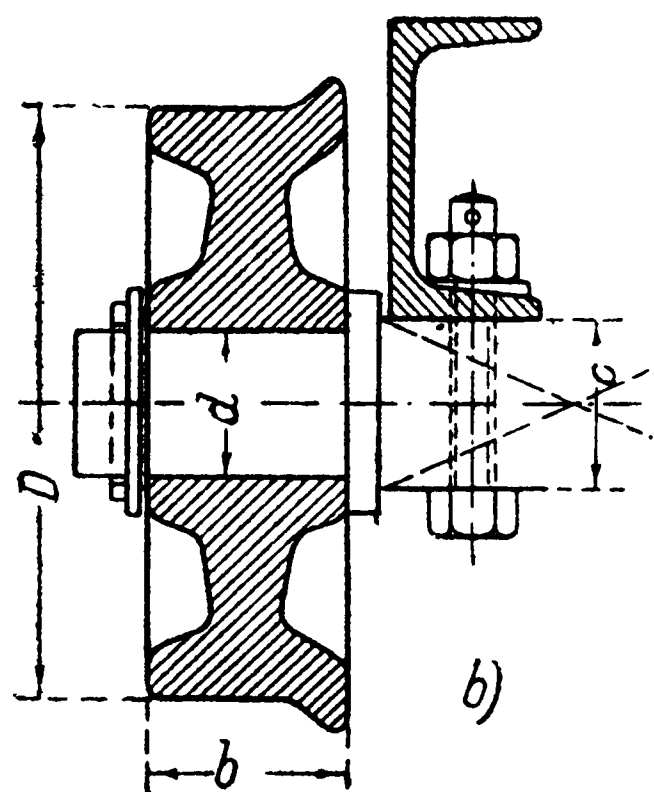
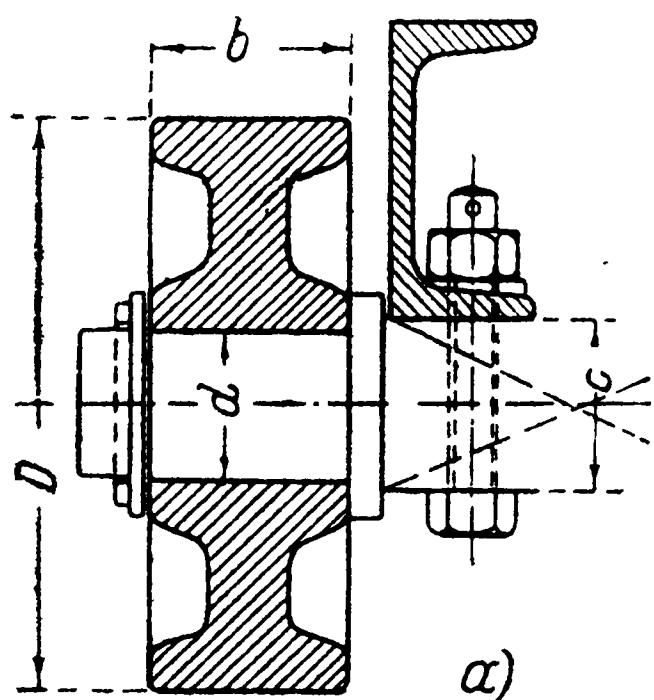


Рис. 205. Деталь тележки и катков бака: *a* — катки гладкие; *b* — катки с ребрами.

опорами служат те детали, при помощи которых усилие может быть передано от станины материалу самого сердечника. В конструкции рис. 204б это будут стягивающие ярмо шпильки 1—2—3, проходящие сквозь сердечник, в конструкции рис. 204а (ГЕСо, МТЗ) — прямоугольные или квадратные брусья *A*, закладываемые в такие же выемки, проштампованные в краях листов стержней и в торцах листов ярем (см. еще чертеж III в приложении). Болты, ввертываемые сквозь станину в эти брусья, работают на срезывание; а так как передача давления брусьями сердечнику происходит через изоляцию (летероид), то давление в этом месте допускается не свыше 500 kG/cm².

При сборке сердечников впритык (рис. 35), основные тяги, скрепляющие стержни с ярмами, длительно подвергаются растягивающему усилию от сил $F_{я}$, с которыми ярмо должно быть прижато к каждому из стержней. Для того чтобы трансформатор не гудел, сила на каждый стержень:

$$F_{я} \approx 4 \left(\frac{B}{10^4} \right)^2 \cdot S \text{ kG.}$$

Те же тяги воспринимают все осевые усилия от короткого замыкания, причем, если эти последние больше, чем усилия от сил $F_{я}$, то в момент короткого замыкания тяги будут подвергаться только усилиям от короткого замыкания.

О прочих механических расчетах деталей трансформаторов можно упомянуть лишь вкратце. Баки рассчитываются на давление 0,3÷1,0 ат сверх атмосферного¹ и на вакуум в 300÷700 мм

¹ По немецким нормам для плоских и эллиптических баков — 1,0 ат сверх атмосферного давления, считая на дне бака; по американским данным для круглых баков — до 10 ат; конечно, только круглые баки могут быть построены на подобные давления.

ртутного столба. Тележка рассчитывается согласно размерам и весу трансформатора. Высота тележки 100÷200 mm для средних трансформаторов и 200÷400 mm — для больших. Катки для тележки выбираются по рис. 205 и табл. 43.

Т а б л и ц а 43

Подъемные приспособления, крюки и т. п. проектируются в соответствии с требованиями ОСТ 2524 о подъеме трансформаторов. Фланцы и краны ставятся соответственно охлаждающей системе трансформатора с учетом возможности производить фильтровку масла.

Из прочих деталей можно упомянуть:

а) консерватор (§ 58),
 б) предохранительную трубу (деталь 22, чертеж III в приложении), применяемую для трансформаторов 1000 kVA и более, тогда как для небольших трансформаторов достаточен небольшой предохранительный клапан на консерваторе, с) газовое реле — для трансформаторов 560 kVA и более, д) предохранители против перехода высшего напряжения на обмотку низшего (применяются, если последнее не превосходит 250 V), е) термометры, маслоуказатели и прочие детали.

Особняком стоят части, связанные с искусственными системами охлаждения, как то: змеевики, насосы, вентиляторы, трубопроводы и т. п.

На этом приходится закончить рассмотрение механических расчетов деталей трансформаторов; подробно см. [Л. 28].

§ 108. Подсчет веса трансформатора, его частей и масла

Вес трансформатора в основном состоит из весов: сердечника, станины, обмоток, изоляции, бака с его деталями и масла. Все эти веса рассчитываются, конечно, с округлением. Вес станины составляет 6 ÷ 16% веса сердечника. Вес изоляции подсчитывается подробно лишь после выполнения всей конструкции. Весьма существенное значение имеет вес выемной части трансформатора (§ 2, п. 5); ориентировочно этот вес можно считать в 1,2 ÷ 1,5 раз больше суммы весов активных стали и меди. Вес бака подсчитать сравнительно нетрудно, вычисляя в отдельности веса стенок, дна и крышки, а также вес трубок для трубчатых баков и вес радиаторов для баков с радиаторами. Вес

¹ Ось — квадратного сечения.

тележки составляет для больших трансформаторов 500 ÷ 1500 kG, для малых — соответственно меньше. Примерный вес изоляторов см. в табл. 44.

Т а б л и ц а 44

Номинальное напряжение kV	Вес изоля- тора kG
6	15
11	18
20	20
35	25
110	300
150	550
220	1200

Вес масла определяется следующим косвенным путем. По размерам бака вычисляется его объем, а затем объем выемной части трансформатора (то и другое в литрах). Вторым объемом определяется на основе некоторого фиктивного удельного веса выемной части, отнесенного к весу $G_c + G_m$; этим учитываются разнообразные удельные веса материалов активной части (металлы, изоляция, дерево). Если в трансформаторе содержится много дерева, то сумму

$G_c + G_m$, выраженную в килограммах, делят на 5,5, а если дерева мало — на 6,0, причем получают объем выемной части в литрах. Вычитая последний из объема бака, получают объем масла, помножая который на $\gamma_{mc} = 0,9$, получают вес масла в килограммах.

Часть третья

ФОРМУЛЯР И ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

§ 109. Формуляр по расчету стержневого трансформатора с круглыми концентрическими обмотками

Задание (§ 14)

$m = \dots\dots\dots$; $P = \dots\dots\dots$; ПКР = $\dots\dots\dots$ %.

$$U_1/U_2 \approx E_1 / E_2 = \dots\dots\dots; \quad f = \dots\dots\dots \text{Hz.}$$

Схема и группа соединений....

Регулировка напряжения...

Охлаждение...

$$e_k = \dots\dots\dots\%; \quad \eta = \dots\dots\dots\%.$$

Основные электрические величины (§ 15)

Пунк- ты	Расчетные формулы						
1	Номинальные фазные напряжения (для трехфазных трансформа- торов): <table> <tr> <td>Соединение Δ</td><td>$U_{1\phi} = U_1 = V; U_{2\phi} = U_2 = V$</td></tr> <tr> <td>$Y^*$</td><td>$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = V; U_{2\phi} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = V$</td></tr> <tr> <td>$Z^1$</td><td>$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = V; U_{2\phi} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = V$</td></tr> </table>	Соединение Δ	$U_{1\phi} = U_1 = V; U_{2\phi} = U_2 = V$	Y^*	$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = V; U_{2\phi} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = V$	Z^1	$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = V; U_{2\phi} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = V$
Соединение Δ	$U_{1\phi} = U_1 = V; U_{2\phi} = U_2 = V$						
Y^*	$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = V; U_{2\phi} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = V$						
Z^1	$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = V; U_{2\phi} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = V$						
2	Коэффициент трансформации: $k_{12} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} \cong \frac{E_{1\phi}}{E_{2\phi}} =$						

¹ Расчетным напряжением для одного из плеч зигзага, т. е. для половины всех витков фазы, является величина $\frac{U}{3}$.

Пунк- ты	Расчетные формулы
3	Номинальные линейные токи для трансформаторов: однофазного $I_1 = \frac{P \cdot 10^3}{U_1} = \quad \text{А}; \quad I_2 = \frac{P \cdot 10^3}{U_2} = \quad \text{А}$ трехфазного $I_1 = \frac{P \cdot 10^3}{U_1 \cdot \sqrt{3}} = \quad \text{А}; \quad I_2 = \frac{P \cdot 10^3}{U_2 \cdot \sqrt{3}} = \quad \text{А}$
4	Здесь P в киловольтамперах. Номинальные токи — фазные или приходящиеся на обмотку одного стержня (для однофазных трансформаторов): Трехфазные трансформаторы $\left\{ \begin{array}{l} \text{соединение } Y^* \text{ и } Z \\ \text{” } \Delta \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} I_{1\phi} = I_1 = \quad \text{А}; \quad I_{2\phi} = I_2 = \quad \text{А} \\ I_{1\phi} = \frac{I_1}{\sqrt{3}} = \quad \text{А}; \quad I_{2\phi} = \frac{I_2}{\sqrt{3}} = \quad \text{А} \end{array}$ Однофазные трансформаторы $\left\{ \begin{array}{l} \text{соединение стержней параллельное} \\ \text{соединение стержней последовательное} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} I_{1\phi} = \frac{I_1}{2} = \quad \text{А}; \quad I_{2\phi} = \frac{I_2}{2} = \quad \text{А} \\ I_{1\phi} = I_1 = \quad \text{А}; \quad I_{2\phi} = I_2 = \quad \text{А} \end{array}$
5	Испытательные напряжения (§ 52).

Оценка задания

См. § 16.

Предварительный расчет (§ 17)

Пунк- ты	Расчетные формулы
6	Зная к. п. д. трансформатора, можно определить общие потери: $P_{\Sigma} = P_0 + P_k = \frac{100 - \eta}{\eta} \cdot P \cdot 10^3 \text{ W};$
7	здесь η — в процентах. Отношение $\xi = P_0/P_k$ необходимо выбрать правильно; оно является одним из основных факторов, определяющих экономику трансформатора (§ 10). Чем относительно больше будет вес активной стали, тем больше будет и ξ . Поэтому для сравнительно высоковольтных (§ 16) трансформаторов ξ будет больше, чем для нормальных; ξ будет больше и у трансформаторов с воздушным охлаждением по причине сравнительно слабой загрузки меди.
8	Потери холостого хода: $P_0 = \frac{\xi}{1 + \xi} P_{\Sigma} \text{ W}.$ Основные потери в сердечнике: $P_c = \frac{P_0}{k_0} \text{ W}; \quad k_0 \text{ см. § 69, формула (109).}$

Пункты	Расчетные формулы
9	Потери короткого замыкания: $P_k = \frac{1}{1+\xi} P_\Sigma$ W. Джоулевы потери в обмотках: $P_m = \frac{P_k}{k_k}$ W; k_k см. § 74.
10	По величине P_m определить значение e_r (§ 77, формула 130); e_r больше у трансформаторов мелких по сравнению с крупными и у высоковольтных по сравнению с нормальными. У мелких трансформаторов e_r может доходить до 50%, тогда как у крупных и при том „богатых медью“ (§ 10) эта величина часто составляет всего несколько десятых долей процента.
11	Определить индуктивность трансформатора $e_s = \sqrt{e_k^2 - e_r^2}$. Эта величина для мелких низковольтных трансформаторов может быть того же порядка, что и e_r; напротив, для мощных и высоковольтных трансформаторов e_s почти не отличается от e_k.
12	По значениям фазных напряжений и токов (п. 1—4) с учетом типа и мощности трансформатора можно выбрать (§ 39) тип обмоток, причем для цилиндрических катушек можно наметить (§ 45) число необходимых поверхностей охлаждения.
13	Для обеспечения охлаждения обмоток следует исходить из допустимых значений q_1 и q_2 (§ 84).
14	Средняя плотность тока $\Delta = \sqrt{\Delta_1 \cdot \Delta_2}$, так как характерной для трансформатора величиной, как известно из теории, является среднее геометрическое из плотностей тока в обеих обмотках. О выборе величины Δ см. § 41. Выбираемые значения Δ увязываются по данным § 84 с значением величин q_1 и q_2 (кривые рис. 152).
15	По плотности тока Δ и по потерям P_m (п. 10) можно найти ориентировочно вес меди $G_m = \frac{P_m}{2,4 \cdot \Delta^2}$ kG (§ 71, формула 113).
16	Для однослойных катушек величины q и Δ непосредственно связаны с допустимой толщиной катушки (§ 84, формулы 158—161). Таким образом, для цилиндрических катушек с учетом числа поверхностей охлаждения (п. 12) можно сразу определить радиальный размер a_1 или a_2. У мощных трансформаторов, у которых концентрические обмотки состоят из дисковых катушек, охлаждение обмоток всегда может быть обеспечено устройством надлежащего числа каналов между катушками (§ 85). Поэтому для них формулы 158 и 159 служат лишь для ориентировки в выборе толщины катушек или — что в данном случае то же самое — осевого размера β сечения провода (рис. 79) при проектировании обмотки, радиальные же размеры катушек a_1 и a_2 предварительно намечаются по табл. 45. Конечно, эти размеры могут быть точно определены только после расчета обмоток. Как и всякие линейные размеры трансформатора, размеры a_1 и a_2 следуют приблизительно законам подбоя (§ 9),

Примечание к п. 8 и 9. Величины P_c и P_m или, точнее говоря, близкие к ним P_0 и P_k гарантируются с точностью $\pm 10\%$; величина P_m относится обычно к температуре обмоток $+75^\circ\text{C}$; величина P_c от температуры не зависит.

Пунк- ты	Расчетные формулы																														
	т. е. они пропорциональны $\sqrt[4]{P}$. Чем больше отличается напряжение U_1 от U_2, тем больше будет отличаться a_1 от a_2, так как при увеличении U_1 растет количество изоляции в обмотке (1); напротив, если U_2 близко к U_1, и вдобавок Δ_1 близко к Δ_2, то размеры a_1 и a_2 будут тоже близкими. Для предварительной оценки этих размеров у нормальных трехфазных трансформаторов можно пользоваться табл. 45. Т а б л и ц а 45 <table><tr><th>Система охлаждения трансформатора</th><th>P kVA</th><th>U_1 kV</th><th>a_1 mm</th><th>a_2 mm</th></tr><tr><td rowspan="4">Естественное масляное охлаждение</td><td>5 ÷ 100</td><td rowspan="2">6,6 ÷ 11,0</td><td>15 ÷ 25</td><td>6 ÷ 12</td></tr><tr><td>180 ÷ 1800</td><td>30 ÷ 40</td><td>12 ÷ 20</td></tr><tr><td>180 ÷ 1800</td><td rowspan="2">38,5</td><td>30 ÷ 40</td><td>20 ÷ 30</td></tr><tr><td>180 ÷ 5600</td><td>40 ÷ 50</td><td>20 ÷ 30</td></tr><tr><td>То же, или с добавочным обдуванием</td><td>5600 ÷ 31500</td><td>121</td><td>70 ÷ 120</td><td>25 ÷ 50</td></tr><tr><td>Естественное воздушное охлаждение</td><td>5 ÷ 200</td><td>До 3</td><td>6 ÷ 20</td><td>6 ÷ 12</td></tr></table> Для однофазных трансформаторов размеры a_1 и a_2 выбираются в соответствии с мощностью, приходящейся на один стержень. Небольшая неточность в предварительной оценке размеров a_1 и a_2 не играет особой роли, так как в расчет величины δ_s (п. 18) входит лишь $\frac{1}{3}$ их суммы. 17 О выборе δ_{12} — изоляционного промежутка между смотками — см. § 63. 18 Приведенное расстояние между обмотками: $\delta_s = \delta_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3},$ если внутри обмоток нет каналов δ_1 и δ_2, параллельных зазору δ_{12}. Об учете наличия этих каналов см. § 53. 19 Отношение l_w/L — средней длины витка к средней высоте обмоток у рационально построенных стержневых трансформаторов равно 1,5 ÷ 1,7; см. § 10, формула (28). 20 Величина коэффициента Роговского K_R берется для трансформаторов данного типа в пределах 0,95 ÷ 0,97; подробно см. § 53. 21 Коэффициентом K_s добавочного рассеяния учитывается увеличение рассеяния от несимметрии в обмотках при наличии регулировки числа витков (§ 53). Предварительно можно брать $K_s = 1,05 \div 1,15$. 22 Напряжение витка: $e_w = \sqrt{\frac{8 \cdot K_s \cdot f \cdot P}{e_s \cdot s} \cdot 10^{-3} \cdot \delta_s \cdot \frac{l_w}{L} \cdot K_R} \cdot \frac{V}{\text{ВИТОК}}.$	Система охлаждения трансформатора	P kVA	U_1 kV	a_1 mm	a_2 mm	Естественное масляное охлаждение	5 ÷ 100	6,6 ÷ 11,0	15 ÷ 25	6 ÷ 12	180 ÷ 1800	30 ÷ 40	12 ÷ 20	180 ÷ 1800	38,5	30 ÷ 40	20 ÷ 30	180 ÷ 5600	40 ÷ 50	20 ÷ 30	То же, или с добавочным обдуванием	5600 ÷ 31500	121	70 ÷ 120	25 ÷ 50	Естественное воздушное охлаждение	5 ÷ 200	До 3	6 ÷ 20	6 ÷ 12
Система охлаждения трансформатора	P kVA	U_1 kV	a_1 mm	a_2 mm																											
Естественное масляное охлаждение	5 ÷ 100	6,6 ÷ 11,0	15 ÷ 25	6 ÷ 12																											
	180 ÷ 1800		30 ÷ 40	12 ÷ 20																											
	180 ÷ 1800	38,5	30 ÷ 40	20 ÷ 30																											
	180 ÷ 5600		40 ÷ 50	20 ÷ 30																											
То же, или с добавочным обдуванием	5600 ÷ 31500	121	70 ÷ 120	25 ÷ 50																											
Естественное воздушное охлаждение	5 ÷ 200	До 3	6 ÷ 20	6 ÷ 12																											

Пункты	Расчетные формулы
	Эта формула получается из выражения для e_s (§ 53). s — число активных стержней трансформатора; прочие величины известны, или уже выбраны. Величина e_w — важнейшая из величин во всем расчете трансформатора.
23	Максимальное значение магнитного потока (при $f = 50$ Hz): $\Phi = \frac{e_w \cdot 10^6}{2,22} \text{ Мх}$
	(§ 37, формула 50).
24	Пользуясь указаниями § 26, выбирают сорт (марку) стали для сердечника, толщину листов и т. д.
25	Величина индукции в стержнях B и в ярах $B_{я}$ выбирается по данным § 26 с учетом коэффициента $k_{я}$ усиления яра (§ 30).
26	По выбранным значениям индукции, пользуясь кривой рис. 135, находят среднее для всего трансформатора значение удельных потерь в сердечнике ν; при большом значении $k_{я}$ следует брать для ν около 0,95 того значения, которое соответствует среднему значению индукции $\frac{B + B_{я}}{2}$, ибо потери ν пропорциональны индукции в степени $1,7 \div 2,5$ (§ 68), а вес стержней примерно равен весу ярем (§ 10).
27	Вес сердечника: $G_c = \frac{P_c}{\nu} \text{ кг}$ (п. 8 и 26).
28	Отношение $\psi = \frac{G_c}{G_{ж}}$ вычисляется для контроля; оно представляет одну из важнейших расчетно-конструктивных характеристик трансформатора. У трансформаторов с относительно малыми потерями в обмотках (трансформаторы высоковольтные) ψ может быть равно $4 \div 6$, в то время как у нормальных трансформаторов с естественным масляным охлаждением $\psi = 2 \div 3,5$; у трансформаторов с воздушным охлаждением $\psi = 1,5 \div 2$ из-за малых значений Δ.
29	Величины активных сечений стержней и ярем определяются по величине магнитного потока Φ и выбранным значениям индукции:
	$S = \frac{\Phi}{B} \text{ см}^2; \quad S_{я} = \frac{\Phi}{B_{я}} \text{ см}^2.$
30	Как вариант можно подсчитать величину S по формуле Арнольда (§ 7, формула 8), так как все величины, стоящие под знаком корня, уже определены или выбраны. В дальнейшем можно вести расчет по обоим вариантам, а затем выбрать лучший.
31	По данным § 29 выбирается число n ступеней сечения стержня и коэффициент $k_{\varnothing}$, а по данным § 27 выбирается k_c.
	Диаметр круга, описанного около ступенчатого сечения стержня:
	$d = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{S}{k_{\varnothing} \cdot k_c}} \text{ см.}$
32	Для проверки порядка получающейся величины d можно воспользоваться приближенными эмпирическими формулами; см. § 9, формулы (15) и (16).
	С достаточной для предварительного расчета точностью можно наметить средние диаметры обмоток (рис. 206), причем надо брать

Пунк-
ты

Расчетные формулы

размеры конструктивные, а именно: a_1 и a_2 — с изоляцией, а δ_{12} — без изоляции. Тогда:

$$d_2 = d + 2\delta_0 + a_2 \text{ мм},$$

$$d_1 = d + 2\delta_0 + 2a_2 + 2a_{12} + a_1 \text{ мм},$$

а средний диаметр обеих обмоток:

$$D = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ мм} \dots \text{см.}$$

Размер зазора δ_0 (рис. 206) можно взять в зависимости от конструкции и мощности трансформатора равным
4÷6 мм для мелких трансформаторов с масляным охлаждением,
10÷15 мм для мелких трансформаторов с воздушным охлаждением,

8÷12 мм для средних трансформаторов с масляным охлаждением,
15÷25 мм для больших трансформаторов с масляным охлаждением,

Средняя длина витка обеих обмоток при круглых катушках:

$$l_w = \pi \cdot D \text{ см.}$$

34

$$L = \frac{l_1 + l_2}{2} = \frac{l_w}{1,7} \div \frac{l_w}{1,5} \text{ см (п. 19).}$$

35

Размер l_0 — расстояние обмоток от яра — является одним из важнейших изоляционных расстояний в трансформаторе; подробно см. 63 §.

36

Длина стержней $l = L + 2l_0$, если на обоих концах обмотки одного стержня выбираются одинаковые изоляционные расстояния l_0 .

37

Отношение l/d у малых и низковольтных трансформаторов составляет 1,8÷2,8; у больших и высоковольтных 3÷4, редко — больше; у трансформаторов с воздушным охлаждением 2,5÷3,5.

38

Весы активных материалов на единицу мощности трансформатора

$$\frac{G_c}{P} = \frac{kG}{kVA}; \quad \frac{G_m}{P} = \frac{kG}{kVA}$$

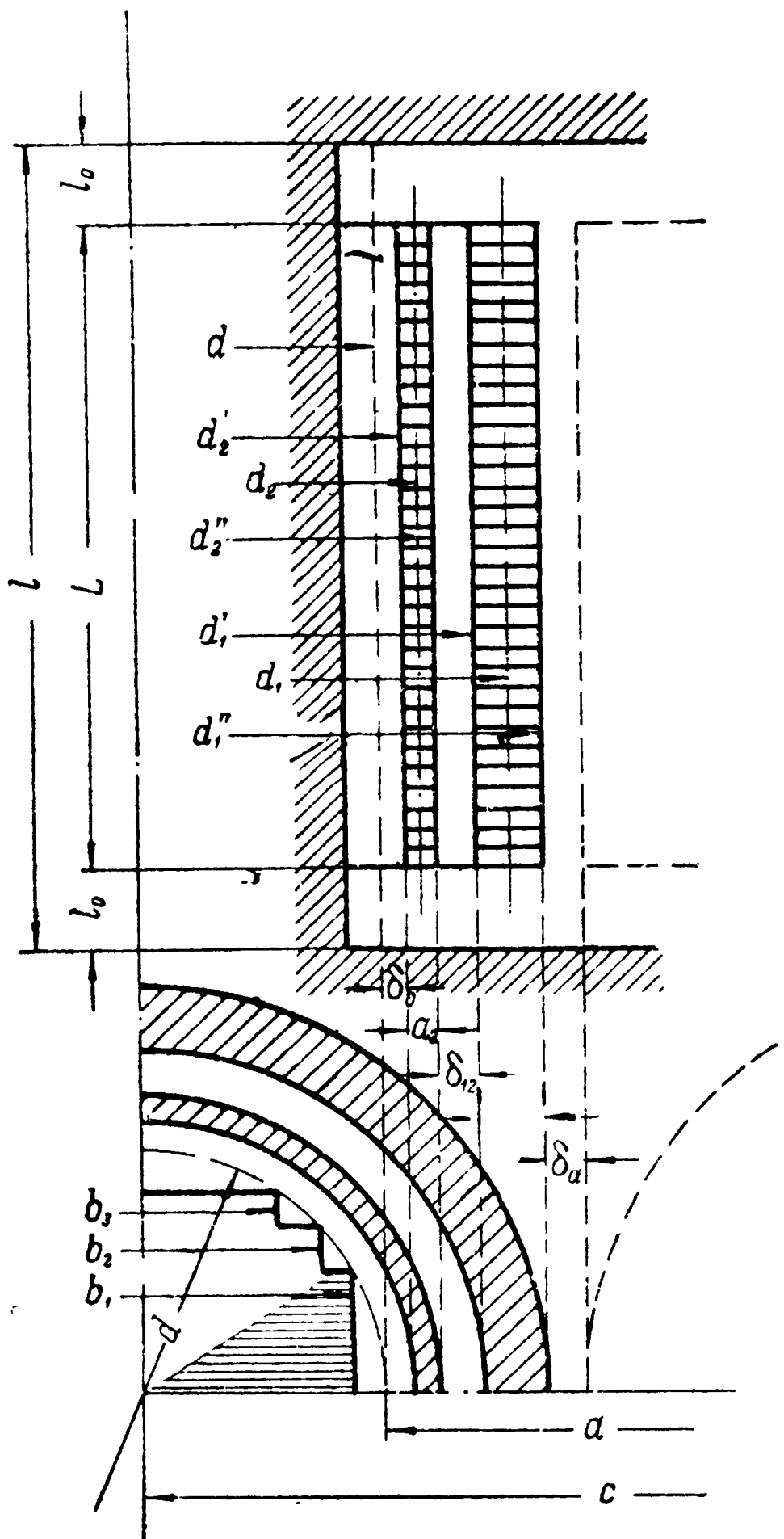


Рис. 206. Эскиз обмоток стержневого трансформатора.

Пунк- ты	Расчетные формулы																		
	характеризуют степень использования активных материалов в трансформаторе. Ориентировочно можно считать, следуя законам подобия (§ 9), для трансформаторов с масляным охлаждением в зависимости от номинального напряжения и пр. при мощности: <table><tr><td>$P \text{ kVA}$</td><td>$\frac{G_c}{P} =$</td><td>$\frac{G_m}{P} =$</td></tr><tr><td>5</td><td>7 ÷ 10 kG/kVA</td><td>2,5 ÷ 4 kG/kVA</td></tr><tr><td>50</td><td>3 ÷ 4,5 "</td><td>1 ÷ 2 "</td></tr><tr><td>500</td><td>1,5 ÷ 2,5 "</td><td>0,5 ÷ 1 "</td></tr><tr><td>5000</td><td>1,0 ÷ 1,5 "</td><td>0,2 ÷ 0,4 "</td></tr><tr><td>50000</td><td>0,5 ÷ 1,0 "</td><td>0,15 ÷ 0,25 "</td></tr></table>	$P \text{ kVA}$	$\frac{G_c}{P} =$	$\frac{G_m}{P} =$	5	7 ÷ 10 kG/kVA	2,5 ÷ 4 kG/kVA	50	3 ÷ 4,5 "	1 ÷ 2 "	500	1,5 ÷ 2,5 "	0,5 ÷ 1 "	5000	1,0 ÷ 1,5 "	0,2 ÷ 0,4 "	50000	0,5 ÷ 1,0 "	0,15 ÷ 0,25 "
$P \text{ kVA}$	$\frac{G_c}{P} =$	$\frac{G_m}{P} =$																	
5	7 ÷ 10 kG/kVA	2,5 ÷ 4 kG/kVA																	
50	3 ÷ 4,5 "	1 ÷ 2 "																	
500	1,5 ÷ 2,5 "	0,5 ÷ 1 "																	
5000	1,0 ÷ 1,5 "	0,2 ÷ 0,4 "																	
50000	0,5 ÷ 1,0 "	0,15 ÷ 0,25 "																	
39	$C_c = p_c \cdot G_c$ руб.; $C_m = p_m \cdot G_m$ руб.; см. § 10, подстрочное примечание. Примерно должно быть $C_c \approx C_m$.																		
40	Для расчета обмоток больших трансформаторов нужно раньше выбрать число радиальных опор. Оно выбирается ориентировочно по данным § 106, а затем может быть проверено по формуле 214 после определения осевого размера β провода.																		
41	Расчет обмоток производится по данным гл. VII; обмоточные данные располагаются в виде табл. 46. При этом, может быть, придется сделать небольшие изменения (порядка 1 ÷ 2%) величины e_w , или прибавить немного (10 ÷ 30 mm) длины стержней и т. д. (§ 17), не изменяя, однако, расчета ни в чем существенном. На схеме обмоток указывается тип применяемого переключателя (§ 43).																		
42	Табл. 46 — обмоточные данные; см. пример 1, § 110. Эскиз обмоток см. рис. 206.																		

Окончательный расчет ¹

Пунк- ты	Расчетные формулы
	Сердечник
43	Сечения стержня и ярма вычертить в масштабе $1/1 \div 1/5$ и определить размеры $b_1, b_2, \dots, h_1, h_2, \dots$, округляя до четных цифр (§ 29); уточнить окончательное значение d .
44	Определить геометрические сечения S' и $S'_я$ и активные сечения S и $S_я$, а именно: $S = k_c \cdot S' \text{ cm}^2; \quad S_я = k_c \cdot S'_я \text{ cm}^2; \quad k_c \text{ см. п. 30.}$
45	Определить точное значение $k_я = \frac{S_я}{S}$

¹ Ведется по окончательным размерам сердечника, обмоток и пр.

Пунк- ты	Расчетные формулы
46	Определить по выбранному числу витков (п. 41) действительную величину: $e_w = \frac{U_{2\phi}}{w_2} \cdot \frac{V}{\text{ВИТОК}}.$
47	Определить окончательные значения: $B = \frac{\Phi}{S} = \frac{e_w \cdot 10^6}{2,22 \cdot S} \text{ Gs}; \quad B_{\text{я}} = \frac{\Phi}{S_{\text{я}}} = \frac{e_w \cdot 10^6}{2,22 \cdot S_{\text{я}}} \text{ Gs}.$
48	Выбрав размер δ_a (§ 63), определить размер c. При круглых обмотках стержневого трансформатора $c = d_1'' + \delta_a$; $a = c - d$. Сделать полный эскиз сердечника.
49	Определить размер $l_{\text{я}}$ (§ 34) и объем ярем.
50	Определить G_c (§ 34).
51	Определить $\psi = G_c / G_m$.
52	По эскизу сердечника определить размеры и число отдельных листов (§ 33).
53	Определить окончательную стоимость сердечника и обмотки (§ 10): $C_c = p_c \cdot G_c$ руб.; $C_m = p_m \cdot G_m$ руб.
54	Коэффициент заполнения окна: $k_m = \frac{2 \cdot (w_1 \cdot S_{m1} + w_2 \cdot S_{m2})}{l \cdot a};$ здесь l и a — в миллиметрах.
Потери и к. п. д. трансформатора	
55	Пользуясь кривыми рис. 135, определить удельные потери v и $v_{\text{я}}$ (§ 68 и 69).
56	По весу стержней и ярем и удельным потерям v и $v_{\text{я}}$ определить общие потери P_c, а с учетом коэффициента k_0 (§ 69) и потери $P_0 = k_0 \cdot P_c$ W.
57	Построить кривую потерь холостого хода (§ 70).
58	Определить потери P_m (§ 71).
59	Определить потери $P_{m\partial}$ (§ 72).
60	Определить сопротивления r_1, r_2 и r_k, причем приведение делать к обмотке высшего напряжения (§ 76).
61	Для мощных трансформаторов определить потери $P_{k\partial}$ W (§ 73).
62	Определить $P_k = P_m + P_{m\partial} + P_{k\partial}$ W.
63	Определить $P_{\Sigma} = P_0 + P_k$ W.
64	Определить η при номинальной нагрузке и $\cos \varphi_2 = 1$ и при $\cos \varphi_2 = 0,8$ (§ 75).
65	Построить кривые $P_k = f_1(P)$; $P_{\Sigma} = f_2(P)$; $\eta = f_3(P)$.
66	Определить отношение $\xi = \frac{P_0}{P_k}$ и сравнить с его значением по п. 7.
Холостой ход трансформатора	
67	Вычислить I_0 и $i_0\%$ при номинальном напряжении, а также для напряжений ниже и выше номинального; расчет вести для низковольтной обмотки (§ 65—67).

Пунк- ты	Расчетные формулы
68	Построить кривую $I_0 = f(U_2)$.
69	$g_0 = \frac{P_0}{s \cdot U_{2\phi}^2} S$ на фазу.
70	$y_0 = \frac{I_{0\phi}}{U_{2\phi}} S$ на фазу.
71	$b_0 = \sqrt{y_0^2 - g_0^2} S$ на фазу.
72	$\cos \varphi_0 = \frac{g_0}{y_0}.$
	Реактивность, напряжение короткого замыкания, треугольник короткого замыкания и изменение напряжения
73	$l_w = \frac{l_{w1} + l_{w2}}{2}.$
74	По эскизу обмоток (рис. 206) определить: $\delta_s = \delta_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3} \text{ см } (a_1 \text{ и } a_2 \text{ см. п. 41; } \delta_{12} \text{ см. п. 17}).$
75	$L = \frac{l_1 + l_2}{2} \text{ см (по эскизу обмоток).}$
76	$K_R = 1 - \frac{a_1 + a_2 + \delta_{12}}{\pi \cdot L} (\S 53).$
77	$K_s = (\S 53).$
78	$e_s = K_s \cdot 8 \cdot f \cdot \frac{P}{s} \cdot \frac{10^{-3}}{e_w^2} \cdot \frac{l_w}{L} \cdot K_R \cdot \delta_s \% (\S 53).$
79	$x_k = \frac{e_s \cdot U_\phi}{I_\phi \cdot 100} \Omega$; вычислять для высоковольтной обмотки.
80	$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} \Omega.$
81	$e_r = \frac{r_k \cdot I_\phi \cdot 100}{U_\phi} \%.$
82	$e_k = \sqrt{e_r^2 + e_s^2} \%.$
83	$\cos \varphi_k = \frac{r_k}{z_k}.$

Пунк- ты	Расчетные формулы								
84	Построить треугольник короткого замыкания по величинам: <table> <tr> <th>для однофазного трансформатора</th><th>для трехфазного трансформатора</th></tr> <tr> <td>$r_k \cdot I$</td><td>$r_k \cdot I \cdot \sqrt{3}$</td></tr> <tr> <td>$x_k \cdot I$</td><td>$x_k \cdot I \cdot \sqrt{3}$</td></tr> <tr> <td>$z_k \cdot I$</td><td>$z_k \cdot I \cdot \sqrt{3}$</td></tr> </table>	для однофазного трансформатора	для трехфазного трансформатора	$r_k \cdot I$	$r_k \cdot I \cdot \sqrt{3}$	$x_k \cdot I$	$x_k \cdot I \cdot \sqrt{3}$	$z_k \cdot I$	$z_k \cdot I \cdot \sqrt{3}$
для однофазного трансформатора	для трехфазного трансформатора								
$r_k \cdot I$	$r_k \cdot I \cdot \sqrt{3}$								
$x_k \cdot I$	$x_k \cdot I \cdot \sqrt{3}$								
$z_k \cdot I$	$z_k \cdot I \cdot \sqrt{3}$								
85	Определить изменение напряжения Δu для $1/1$ нагрузки и значений $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$.								
86	Построить кривую $\Delta u = f(\cos \varphi_2)$ при нагрузке номинальным током.								
Расчет электрической прочности									
87	Подсчитать электрический градиент между обмотками (§ 63, п. 2) при испытательном напряжении.								
88	Проверить ярмовую изоляцию (§ 63, п. 3). Расчеты по п. 87 и 88 производятся при проектировании новых типов трансформаторов с номинальным высшим напряжением в 22 kV и выше.								
Тепловые расчеты									
89	Проверить нагревание стержня и верхнего ярма, определив величины q_c , τ_I и τ_2 (§ 84—86 и 87).								
90	Проверить нагревание обмотки (I), определив величины q_m , τ_I и τ_{II} (§ 84, 85, 87 и 89).								
91	Произвести те же расчеты для другой (других) обмоток трансформатора.								
92	Для трансформаторов с естественным масляным охлаждением $\tau_{III} \approx 3 \div 5^\circ\text{C}$ (§ 90).								
Расчет бака или иного охладителя									
93	$\tau_{IV} = \tau_m - (\tau_I + \tau_{II} + \tau_{III})^\circ\text{C}$. Расчет ведется для той обмотки, у которой значения величин τ_I и τ_{II} наибольшие.								
94	По эскизу активной части трансформатора в плане определить внутренние размеры бака A_δ и B_δ (§ 97) и выбрать его форму (овальный или прямоугольный).								
95	Определить число волн (трубок или радиаторов), которое может разместиться на баке, а также профиль волн, диаметр трубок или тип радиаторов и их размещение (§ 97—101).								
96	Определить коэффициент увеличения поверхности бака от наличия волн, трубок или радиаторов (§ 99—101).								
97	Определить соответствующее значение общего коэффициента K теплоотдачи (§ 99—101).								
98	Определить допустимую среднюю удельную тепловую загрузку q_δ поверхности бака: $q_\delta = \tau_{IV} \cdot K \text{ W/m}^2$.								
99	Определить полную охлаждающую поверхность бака:								
	$O_\delta = \frac{1,1 \cdot P_\Sigma}{q_\delta} \text{ m}^2.$								

Пунк- ты	Расчетные формулы
100	Учесть поверхность крышки и определить по развернутому периметру бака активную высоту волн, а затем, с учетом пояса поверх волн, определить и полную высоту бака. Для трубчатого или радиаторного бака — учесть и поверхность самого бака.
101	Сделать эскиз бака.
102	Определить точное значение τ_{III} (§ 90).
103	Определить $\tau_{IVm} = (1,15 \div 1,25) \tau_{IV}$ (§ 99).
104	Изобразить примерное распределение температур и превышений температур в обмотках, сердечнике и масле (§ 80, 86—89).
105	Определить объем V_{δ} бака (включая волны, трубки или радиаторы).
106	Определить примерный вес бака.
107	Определить объем выемной части трансформатора (§ 108).
108	Объем масла $V_{mc} =$ литров (§ 108).
109	Вес масла $G_{mc} = 0,9 \cdot V_{mc}$ kG.
110	$T = \frac{\Sigma (G \cdot c \cdot \tau_m)}{3600 \cdot P_{\Sigma}} \text{ час. (§ 93),}$ $T_m = \frac{\tau_m \cdot (G_m \cdot c_m + i \cdot G_u \cdot c_u)}{60 \cdot P_m} \text{ мин. (§ 93).}$
111	Построить кривые нагревания для $1/1$ и $5/4$ нагрузки (§ 92 и 94 п. 4).
112	Определить превышения температуры и сами температуры в обмотках при $5/4$ нагрузки (§ 95).
	Расчет обдувания бака (§ 102)
113	Определить количество охлаждающего воздуха.
114	Выбрать вентилятор.
115	Определить значение T при работе с вентилятором.
	Расчет охладителя масла (§ 104)
116	Выбрать тип охладителя.
117	Определить поверхность охладителя.
118	Определить количество циркулирующего масла.
119	Определить количество охлаждающей воды или воздуха.
120	Если выбрано внутреннее водяное охлаждение (§ 103), то произвести расчет змеевика.
	Механические расчеты
121	Определить усилие F_r (§ 105).
122	Определить усилие F_a (§ 105) для всех обмоток.
123	Выбрать систему укрепления обмоток.
124	Определить напряжение в материале наружной обмотки (§ 106).
125	Определить удельное давление на опорах (§ 106).
126	Выбрать систему укрепления всего сердечника (конструкция станины); см. § 107.
127	Провести механический расчет бака (§ 107).
128	Посчитать веса всех частей трансформатора и его общий вес G_{mp} (§ 108).
129	Выполнить эскизы и чертежи трансформатора и его деталей.
130	Определить габаритные размеры трансформатора.

§ 110. Пример 1. Расчет трехфазного трансформатора 50 kVA, 10 000/400 V, 50 Hz с естественным масляным охлаждением

Задание

$m = 3$; $P = 50$ kVA; ПКР = 100%; $f = 50$ Hz.
 $U_1/U_2 \approx E_1/E_2 = 10\,000 \pm 5\%/400$ V.
Схема и группа соединений Y/Y₀ — 12.
Переключатель — с первичной стороны.
Охлаждение — естественное масляное.
 $e_k = 3,6\%$; $\eta = 96,8\%$.

Основные электрические величины

Пункты	Расчетные формулы
1	$U_{1\phi} = \frac{10\,000}{\sqrt{3}} = 5780$ V; $U_{2\phi} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231$ V.
2	Коэффициент трансформации $k_{12} = \frac{10\,000}{\sqrt{3}} : \frac{400}{\sqrt{3}} = 25$.
3	$I_1 = \frac{50 \cdot 10^3}{10\,000 \cdot \sqrt{3}} = 2,89$ A; $I_2 = \frac{50 \cdot 10^3}{400 \cdot \sqrt{3}} = 72,2$ A.
4	$I_{1\phi} = 2,89$ A; $I_{2\phi} = 72,2$ A.
5	Испытательные напряжения по немецким нормам: для обмотки (1) $3,25 U_1 = 32,5$ kV, а для обмотки (2) 2,5 kV.

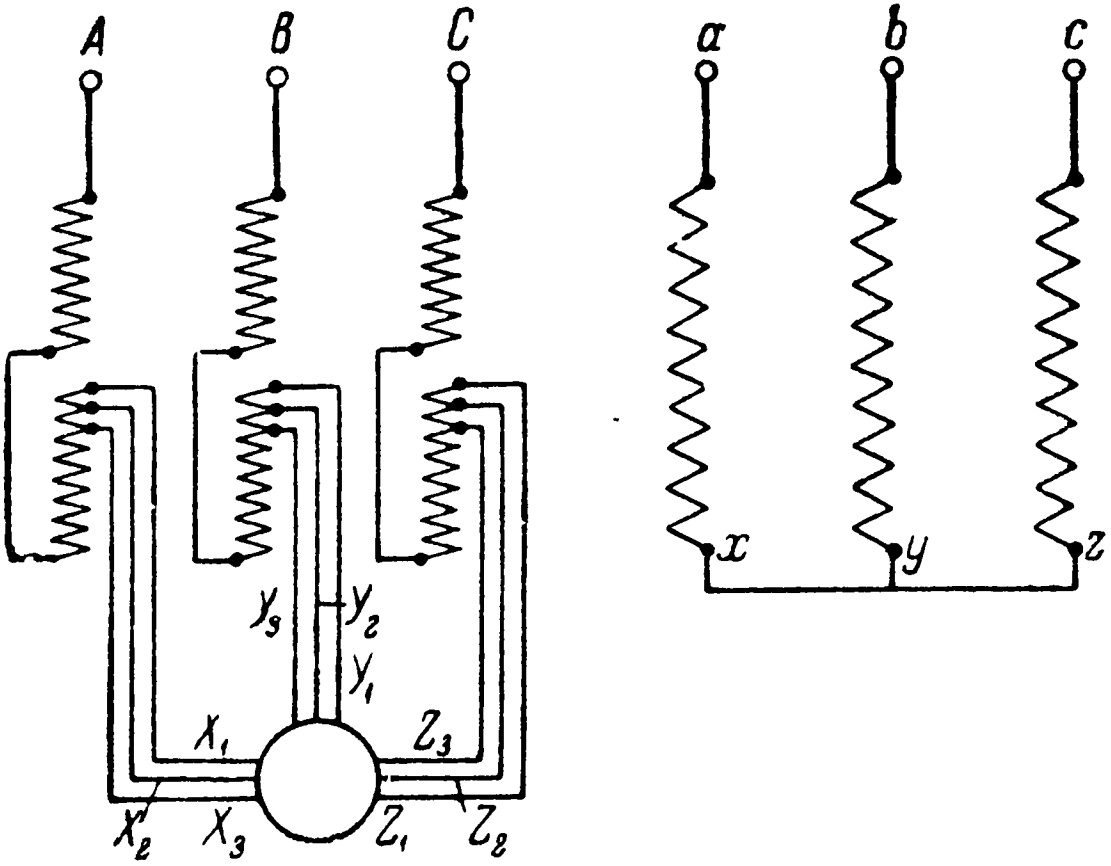
Оценка задания

Из задания и из вычисленных значений фазных напряжений и токов можно усмотреть, что данный трансформатор принадлежит к числу нормальных силовых. Тип взят стержневой с вертикальными стержнями и круглыми concentрическими обмотками. Напряжение короткого замыкания $e_k = 3,6\%$, взято меньшим, чем полагается по ОСТ 2524 для подобного трансформатора, и равным значению e_k для трансформатора с воздушным охлаждением такой же мощности (пример 2). Конструкция выбрана применительно к типам трансформаторов Бергмана (Bergmann); см. чертеж I в приложении.

Предварительный расчет

Пунк- ты	Расчетные формулы
6	$P_{\Sigma} = \frac{100 - 96,8}{96,8} \cdot 50 \cdot 10^3 = 1655 \text{ W.}$
7	$\xi = 0,33.$
8	$P_0 = \frac{0,33}{1 + 0,33} \cdot 1655 = 410 \text{ W}; \quad k_0 = 1,1; \quad P_c = \frac{410}{1,1} = 373 \text{ W.}$
9	$P_k = \frac{1}{1 + 0,33} \cdot 1655 = 1245 \text{ W}; \quad k_k = 1,05; \quad P_m = \frac{1245}{1,05} = 1185 \text{ W.}$
10	$e_r = \frac{1245 \cdot 100}{50 \cdot 10^3} = 2,49\%.$
11	$e_s = \sqrt{3,6^2 - 2,49^2} = 2,61\%.$
12	Обмотка высшего напряжения — многосрядная, из катушек, намотанных на цилиндр, обмотка (2) низшего напряжения в виде одной цилиндрической катушки в 2 слоя; у последней 2 поверхности сжатия, в обмотке же (1) высшего напряжения лишь одна (наружная) поверхность охлаждения.
13	Такие небольшие трансформаторы обычно имеют небольшую тепловую загрузку поверхностей охлаждения; можно принять $q_1 = 1000 \text{ W/m}^2$, $q_2 = 600 \text{ W/m}^2$.
14	Выбирается $\Delta = \sqrt{2,7 \cdot 3,2} = 2,9 \text{ A/mm}^2$, причем $\Delta_1 = 2,7 \text{ A/mm}^2$, а $\Delta_2 = 3,2 \text{ A/mm}^2$, так как в высоковольтной многослойной обмотке (1) будет внутренний перепад температуры τ_1 , которого почти не будет в обмотке (2).
15	$G_m = \frac{1185}{2,4 \cdot 2,9^2} = 58,7 \text{ kG.}$
16	По кривым рис. 152 при значениях $\Delta_2 = 3,2 \text{ A/mm}^2$ и $q_2 = 600 \text{ W/m}^2$ и при охлаждении цилиндрической катушки с двух сторон a_2 может быть около 6,0 мм. Но так как изолированного провода толщиной 6,0 мм нет (табл. 12), то берутся два слоя обмотки с толщиной провода $a_2 = 3,05 \text{ mm}$ (см. также табл. 45). По этой же таблице берется $a_1 \approx 20 \text{ mm}$.
17	Промежуток δ_{12} выбирается равным 12 мм; он состоит из масляного канала в 5,5 мм, цилиндра $\delta_{\text{ц}} = 3,0 \text{ mm}$, добавочной подмотки 3,0 мм из пресшпана (рис. 208) и общей толщины изоляции на проводах 0,5 мм.
18	$\delta_s = 1,2 + \frac{2,0 + 0,6}{3} \approx 2,1 \text{ cm} (\delta_1 = 0; \delta_2 = 0).$
19	$l_w/L = 1,7.$
20	$K_R = 0,97.$
21	$K_s = 1,1.$
22	$e_w = \sqrt{\frac{1,1 \cdot 8 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 2,1 \cdot 0,97 \cdot 1,7}{2,61 \cdot 3}} = 3,11 \frac{\text{V}}{\text{виток}}$ (число активных стержней $s = 3$).

Пункты	Расчетные формулы
23	$\Phi = \frac{3,11 \cdot 10^6}{2,22} = 1,405 \cdot 10^6 \text{ Мх.}$
24	Марка стали ЕС4А; толщина листов 0,35 mm.
25	Выбираем $B = 13\,500 \text{ Gs}$; $k_{\text{я}} = 1,3$.
	Тогда: $B_{\text{я}} = \frac{13\,500}{1,3} = 10\,400 \text{ Gs.}$
26	Для $B = 13\,500 \text{ Gs}$ $v = 2,6 \text{ W/kG}$, для $B_{\text{я}} = 10\,400 \text{ Gs}$ $v_{\text{я}} = 1,4 \text{ W/kG}$, $v_{\text{ср}} = 0,9 \cdot \frac{2,6 + 1,4}{2} = 1,8 \text{ W/kG.}$
27	$G_c = \frac{373}{1,8} = 207 \text{ kG.}$
28	$\psi = \frac{207}{58,7} = 3,54$ — значение, нормальное для небольших трансформаторов с масляным охлаждением.
29	$S = \frac{1,405 \cdot 10^6}{13\,500} = 104 \text{ см}^2$; $S_{\text{я}} = \frac{1,405 \cdot 10^6}{10\,400} = 135 \text{ см}^2$.
	По формуле (8): $S = 0,34 \sqrt{\frac{50 \cdot 10^9 \cdot 3,54}{50 \cdot 11\,950 \cdot 2,9}} = 108 \text{ см}^2$, где $11\,950 = \frac{13\,500 + 10\,400}{2} \text{ Gs}$. Останавливаемся на значении $S = 105 \text{ см}^2$.
30	$k_{\text{ж}} = 0,84$ для трехступенчатого стержня ($n = 3$); $k_c = 0,85$ при бумажной изоляции листов.
31	$d = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{105}{0,84 \cdot 0,85}} = 13,7 \text{ см} = 137 \text{ mm.}$
	По ориентировочной формуле § 9 $d = 6,3 \sqrt[4]{16,7} = 12,8 \text{ см}$, где 16,7 kVA — мощность на один стержень. Окончательно берется $d = 136 \text{ mm}$.
32	Выбирая канал у стержня $\delta_0 = 5 \text{ mm} = 0,5 \text{ см}$ и размер a_2, с изоляцией около 7 mm (п. 16), имеем: $d_2 = 136 + 2 \cdot 5 + 7 = 153 \text{ mm}$, $d_1 = 136 + 2 \cdot 5 + 2 \cdot 7 + 2 \cdot 12 + 20 = 204 \text{ mm}$, $D = \frac{153 + 204}{2} = 178,5 \text{ mm}$.
33	$l_{\text{w}} = \pi \cdot 178,5 = 563 \text{ mm} = 56,3 \text{ см.}$
34	$L = \frac{563}{1,7} = 330 \text{ mm.}$

Пункты	Расчетные формулы
35	$l_0 = 20 \text{ mm.}$
36	$l = 330 + 2 \cdot 20 = 370 \text{ mm.}$
37	$l/d = 370/136 = 2,72$ — значение, нормальное для небольших трансформаторов с масляным охлаждением.
38	$\frac{G_c}{P} = \frac{207}{50} = 4,18 \text{ kG/kVA}; \frac{G_m}{P} = \frac{58,7}{50} = 1,175 \text{ kG/kVA}$, что не выходит из нормы.
39	$G_c = 1,0 \cdot 207 = 207 \text{ руб.}; G_m = 3,5 \cdot 58,7 = 205 \text{ руб.}$
40	Для малого трансформатора число опор (наименьшее возможное) равно 4.
	
Рис. 207. Схема соединения обмоток.	
41	Расчет обмоток (табл. 46). Схема соединений обмоток (рис. 207).
Обмотка (2) низшего напряжения	
$w_2 = \frac{231}{3,11} = 74,1$, округляя, 74 витка. Обмотка цилиндрическая в два слоя (п. 16); между слоями пресшпан толщиной 0,5 mm. Осевой размер витка с изоляцией равен $\frac{330}{(37+1) \cdot 1,05} = 8,26 \text{ mm}$, или $8,26 - 0,5 = 7,76 \text{ mm}$ без изоляции. В табл. 12 находим размер провода 7,4 mm, так как следующий больший будет уже 8,0 mm, что явно не подходит. Размер витка с изоляцией $\beta_{2u} = 7,4 + 0,5 = 7,9 \text{ mm}$.	
Тогда $l_2 = (37 + 1) \cdot 7,9 \cdot 1,05 = 315 \text{ mm}$; этот размер разгоняется до 320 mm — длины обмотки (l); см. ниже.	

Пунк- ты	Расчетные формулы										
	При $\Delta_2 = 3,2 \text{ A/mm}^2$ сечение провода $S_{м2} = \frac{72,2}{3,2} = 22,5 \text{ mm}^2$. Подходящее сечение имеет провод с размерами: $\frac{3,05 \times 7,4 \text{ mm (голый)},}{3,55 \times 7,9 \text{ mm (изолированный)}}.$ Провод марки ПББО. Точное значение сечения $S_{м2} = 22,6 - 0,2 = 22,4 \text{ mm}^2$ (закругление в углах сечения). Окончательно $\Delta_2 = \frac{72,2}{22,4} = 3,22 \text{ A/mm}^2$. Радиальный размер обмотки $a_2 = 2 \cdot 3,55 + 0,5 = 7,6 \text{ mm}$, округляя, 8,0 mm. Обмотка (I) высшего напряжения $w_1 = \frac{74 \cdot 10\,000}{400} = 1850 \text{ витков.}$ $\frac{5}{100} 1850 \approx 92$ витка; витки по ступеням регулировки: 1758 — 1850 — 1942 витков. Обмотка из многорядных дисковых катушек (§ 47), намотанных на цилиндр толщиной 3,0 mm. Считая по 600 V на катушку, на фазу придется взять $\frac{5780}{600} \approx 10$ катушек (рис. 208). При $\Delta_1 = 2,7 \text{ A/mm}^2$, $S_{м1} = \frac{2,89}{2,7} = 1,07 \text{ mm}^2$. По табл. 13 выбирается провод $\varnothing 1,16/1,50 \text{ mm}$, марки ПЭБД. Сечение его 1,057 mm². Окончательно $\Delta_1 = \frac{2,89}{1,057} = 2,72 \text{ A/mm}^2$. Размер окна $l = 370 \text{ mm}$ желательно сохранить, так как сердечник трансформатора может быть применен и на 11 000 V; а так как l_2 получилось равным 315 mm, то можно увеличить этот размер до 320 mm. Тогда $l_1 = l_2 = 320 \text{ mm}$, $l = 320 + 2 \cdot 25 = 370 \text{ mm}$. В обмотке (I) вдоль оси потеряется всего: <table> <tr> <td>На шайбы 10×2</td><td>20 mm</td></tr> <tr> <td>На „разрыв“ δ_p добавочно (рис. 208) .</td><td>10 „</td></tr> <tr> <td>В катушках — по одному месту в каждой, а всего $10 \times 1 \times 1,5$</td><td>15 „</td></tr> <tr> <td colspan="2"> </td></tr> <tr> <td>Итого . . .</td><td>45 mm</td></tr> </table> Вдоль оси поместится $\frac{320 - 45}{1,5} = 183$ провода; с учетом неплотности намотки поместится 180 проводов, разбиваемых на 10 катушек, по 18 проводов в каждой. Число слоев $n_a = \frac{1942}{180} \approx 11$; однако, так как начальная катушка будет иметь усиленную изоляцию, и так как наружный слой катушек рекомендуется делать неполным (§ 47), то придется взять 12 слоев, причем наружный — неполный.	На шайбы 10×2	20 mm	На „разрыв“ δ_p добавочно (рис. 208) .	10 „	В катушках — по одному месту в каждой, а всего $10 \times 1 \times 1,5$	15 „			Итого . . .	45 mm
На шайбы 10×2	20 mm										
На „разрыв“ δ_p добавочно (рис. 208) .	10 „										
В катушках — по одному месту в каждой, а всего $10 \times 1 \times 1,5$	15 „										
Итого . . .	45 mm										

Пунк-
ты

Расчетные формулы

42

Окончательная разбивка витков по катушкам производится путем арифметического подбора (табл. 46, графа 8), причем стараются делать не более 3 типов катушек, считая и начальную, в которой провод добавочно обматывается лентой и между тремя наружными слоями ставится прокладка толщиной 0,2 mm (вместо 0,1 mm у промежуточных катушек).

Радиальный размер катушек $a_1 = 12 \cdot (1,5 + 0,1) = 19$ mm при квадратном расположении (§ 47).

Размеры обеих обмоток см. рис. 208.

Т а б л и ц а 46

Обмоточные данные

Число активных стержней 3. $e_w = 3,12 \frac{V}{\text{виток}}$.

Графа		№ обмоток				Примечания
		1		2	П. 18	
1	Ток в обмотке . . (А)	2,89		72,2	П. 3	
2	Напряжение обмотки (V)	$10\,000 \pm 5\% / \sqrt{3}$		$400 / \sqrt{3}$	П. 1	
3	Тип обмоток	Концентрические				
4	Число витков обмотки	1758—1850—1942		74	§ 38	
5	Обозначение катушек	I на- чальн.	II	III	—	
6	Тип катушек	Многорядные дисковые		Цилин- дриче- ские	§ 45—51	
7	Число катушек на стержне (правых) . .	—	5	1		
	Число катушек на стержне (левых) . .	1	3	—		
8	Число витков в катушке	150	201	184		
9	„ полных слоев . .	6	3	11		
10	„ витков в слое .	18	12	18	37	
11	Витки в неполном слое	6	3	4	—	
12	Плотность тока (А/mm ²)	2,72	2,72	2,72	3,22	§ 41
13	Сечение витка . (mm ²)	1,057	1,057	1,057	22,4	§ 42
14	Размеры провода го- лого (mm)	Ø 1,16	Ø 1,16	Ø 1,16	3,05 × 7,4	§ 42
15	Марка провода	ПЭБД	ПЭБД	ПЭБД	ПББО	§ 40
16	Размеры провода изс- лированного . (mm)	Ø 1,50	Ø 1,50	Ø 1,50	3,55 × 7,9	§ 40
17	Число проводов в витке	1	1	1	1	§ 42

Пунк- ты		Расчетные формулы					
Число активных стержней 3. $e_w = 3,12 \frac{V}{\text{ВИТОК}}$							
Графа		№ обмоток				Приме- чания	
		1		2			П. 18
18	Размеры витка с изо- ляцией (mm)	Ø 1,50	Ø 1,50	Ø 1,50	3,55 × 7,9	§ 42	
19	Добавочная изоляция витка (mm)	—	—	—	—	§ 60	
20	Добавочная изоляция слоев (mm)	0,2	0,1	0,1	0,5	§ 47	
21	Добавочная изоляция катушек . . . (mm)	—	—	—	—	—	
22	Каналы	—	—	—	—	§ 85	
23	Ответвления	Одно в катушке III после 92-го витка, считая изнутри, другое между ка- тушками III и II (см. рис. 207 и 208)				§ 44	
24	Размеры катушек	внутренние . . (mm)	Ø 185	Ø 185	Ø 185	Ø 146	} Рис. 208
25		наружные . . (mm)	Ø 223	Ø 223	Ø 223	Ø 162	
26		осевые (mm)	29,2	29,2	29,2	315	
27		радиальные . (mm)	19	19	19	8	
28		средняя длина вит- ка (m)	0,64	0,64	0,64	0,485	
29		оправка (mm)	Намотка на ци- линдр			Ø 146	
30	Вес меди	активной, для номи- нального напря- жения . . . (kG)	33,3		21,4	—	
		всей, с изоляцией (kG)	37,7		22	§ 52	
31	Включение катушек одного стержня . .		Последовательное		—	—	
32	Включение стержней .		Y		Y ₀	—	
33	Расчет радиальных раз- меров		—		—	—	
34	Расчет осевых размеров		—		—	—	
35	Эскизы обмоток и вит- ков		Схема обмоток и пр.			—	

Пунк- ты	Расчетные формулы
	К графе 33. Подсчет диаметров и радиальных разме- ров (рис. 208). Изолирующий цилиндр имеет размеры: диаметры 173/179 mm, длина 360 mm. $d = 136 \text{ mm}$ $2\delta_0 = 10 \text{ mm}$ $d'_2 = 146 \text{ mm}$ $2a_2 = 16 \text{ mm}$ $d''_2 = 162 \text{ mm}$ $2\delta_{12} = 23 \text{ mm}$¹ $d''_1 = 185 \text{ mm}$ $2a_1 = 38 \text{ mm}$ $d''_1 = 223 \text{ mm}$ $\delta_a = 17 \text{ mm}$ $c = 240 \text{ mm}$ Рис. 208. Эскиз обмоток.
	¹ Без изоляции на проводе.

Окончательный (детальный) расчет

Пунк- ты	Расчетные формулы				
43	Сердечник (рис. 209) $b_1 = 0,906 \cdot 136 = 124 \text{ mm},$ $b_2 = 0,707 \cdot 136 = 96 \text{ mm},$ $b_3 = 0,424 \cdot 136 = 58 \text{ mm},$ $b_{1я} = 1,3 \cdot 124 = 162 \text{ mm},$ $b_{2я} = 1,3 \cdot 96 = 124 \text{ mm},$ $b_{3я} = 1,3 \cdot 58 = 76 \text{ mm},$ $h = 124 \text{ mm}.$ Все цифры округлены до четных.				
44	$S = (12,4 \cdot 2,9 + 9,6 \cdot 1,9 + + 5,8 \cdot 1,4) \cdot 2 \cdot 0,85 = 106 \text{ cm}^2,$ $S_{я} = (16,2 \cdot 2,9 + 12,4 \cdot 1,9 + + 7,6 \cdot 1,4) \cdot 2 \cdot 0,85 = 138 \text{ cm}^2.$				
45	$k_{я} = \frac{138}{106} = 1,3.$				
46	$e_w = \frac{231}{74} = 3,12 \frac{\text{V}}{\text{виток}} \text{ (из табл. 46).}$				
47	$B = \frac{3,12 \cdot 10^6}{2,22 \cdot 10^6} = 13\,300 \text{ Gs};$ $B_{я} = \frac{13\,300}{1,3} = 10\,200 \text{ Gs}.$				
48	$c = 240 \text{ mm (табл. 46)}, a = 240 - 136 = 104 \text{ mm}.$				
49	Так как сечение ярма — ступенчатое, то сразу вычисляется активный объем обоих ярем (размеры в дециметрах): $2 \cdot 0,85 \cdot (2 \cdot 2,4 \cdot 1,38 + 1,24 \cdot 1,62 \cdot 0,58 + 0,96 \cdot 1,24 \cdot 0,38 + + 0,58 \cdot 0,76 \cdot 0,28) = 14,2 \text{ dm}^3.$				
50	<table><tr><td>Вес стержней</td><td>$3 \cdot 3,7 \cdot 1,06 \cdot 7,6 = 89,5 \text{ kG}$</td></tr><tr><td>„ ярем</td><td>$14,2 \cdot 7,6 = 108 \text{ „}$</td></tr></table> Вес всего сердечника . . $G_c = 197,5 \text{ kG}$ Согласно п. 27 предварительного расчета было 207 kG.	Вес стержней	$3 \cdot 3,7 \cdot 1,06 \cdot 7,6 = 89,5 \text{ kG}$	„ ярем	$14,2 \cdot 7,6 = 108 \text{ „}$
Вес стержней	$3 \cdot 3,7 \cdot 1,06 \cdot 7,6 = 89,5 \text{ kG}$				
„ ярем	$14,2 \cdot 7,6 = 108 \text{ „}$				
51	$\psi = \frac{197,5}{54,7} = 3,6, \text{ так как общий вес активной меди, согласно табл. 46. составляет } 33 + 21,4 = 54,7 \text{ kG. Согласно п. 28 предвари- тельного расчета } \psi = 3,54.$				

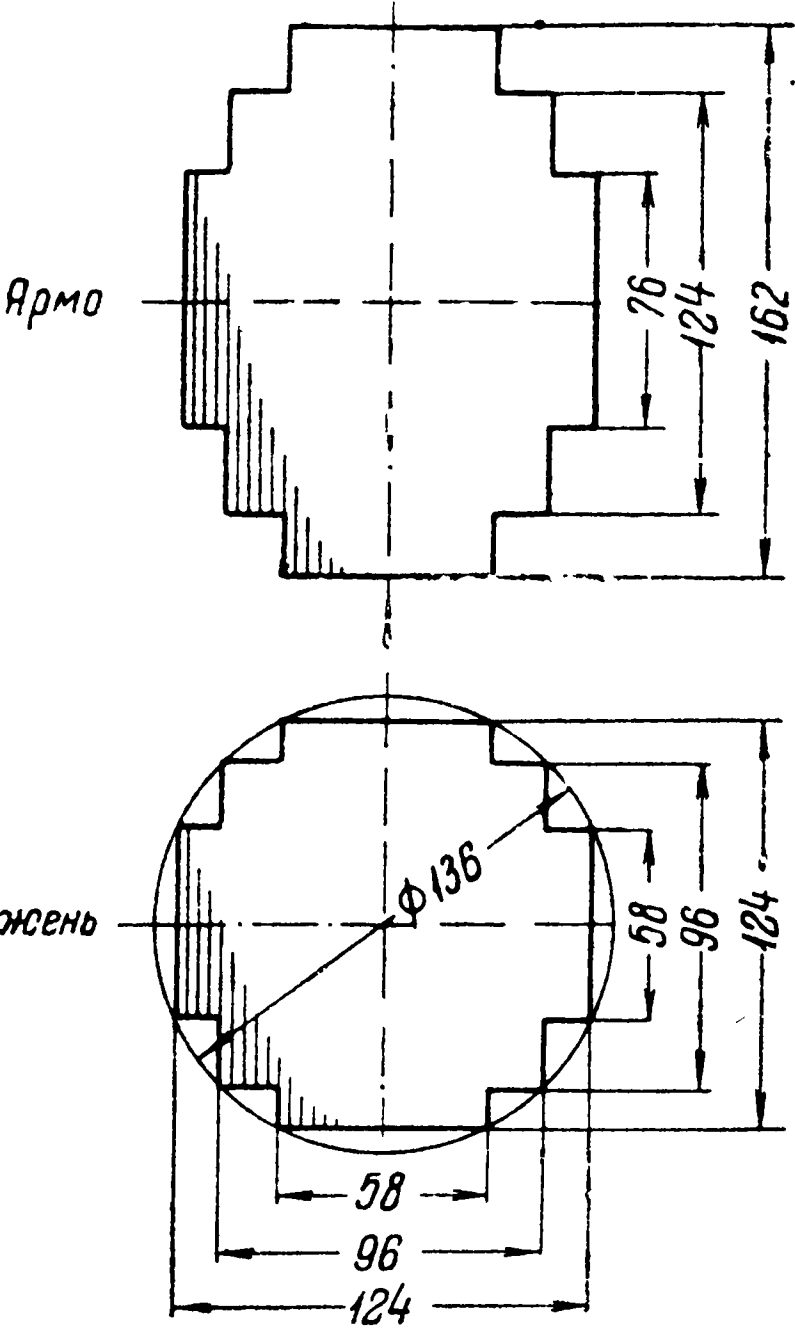


Рис. 209. Сечение стержня и ярма.

Пунк-
ты

Расчетные формулы

52

Число и размер листов, потребных для сердечника, см. рис. 210 и табл. 47.

Рис. 210. Листы сердечника.

Таблица 47

Де- таль	Размеры листов mm	Число листов	Де- таль	Размеры листов mm	Число листов
1	124 × 532	$\frac{58 \cdot 0,85}{0,35} = 142$	5	124 × 240	92
2	162 × 240	142	6	124 × 384	92
3	162 × 356	142	7	58 × 532	$\frac{28 \cdot 0,85}{0,35} = 68$
4	96 × 532	$\frac{38 \cdot 0,85}{0,35} = 92$	8	76 × 240	68
			9	76 × 422	68

Пунк- ты	Расчетные формулы
53	$C_c = 1 \cdot 197,5 = 197$ руб. 50 коп.; $C_n = 3,5 \cdot 59,7 = 209$ руб.; обмотка (I) из сравнительно дорогого провода небольшого сечения.
54	$k_n = \frac{2 (1942 \cdot 1,057 + 74 \cdot 22,4)}{370 \cdot 104} = 0,193.$
	Потери и к. п. д. трансформатора
55	Индукции $B = 13\,300$ Gs соответствует $v = 2,5$ W/kG; индукции $B_n = 10\,200$ Gs соответствует $v_n = 1,35$ W/kG.
56	$P_c = (89,5 \cdot 2,5 + 108 \cdot 1,35) = 370$ W. $P_0 = 1,1 \cdot 370 = 407$ W; согласно п. 8 предварительного расчета $P_0 = 410$ W. По данным каталога Бергмана гарантируются потери 425 W $\pm 10\%$; эта цифра и принята в дальнейшем.
57	Кривая потерь P_0 в сердечнике (рис. 211) строится по данным первой половины табл. 49 (п. 68).
58	$P_{m1} = 2,4 \cdot 2,74^2 \cdot 33,3 = 595$ W $P_{m2} = 2,4 \cdot 3,22^2 \cdot 21,3 = 528$ „ $P_m = 1123$ W
59	На все добавочные потери при нагрузке, ввиду их малости и трудности учета в столь небольшой конструкции, можно принять около $6,5\%$ от суммы всех потерь без особого расчета, т. е. положить: $P_{мд} \approx 0,065 \cdot 1123 = 75$ W, относя их условно к потерям в меди и распределяя на обе обмотки пропорционально потерям в них.
60	$r_1 = \left(595 + \frac{75 \cdot 595}{1123} \right) \cdot \frac{1}{3 \cdot 2,89^2} = 25,4$ Ω, $r_2 = \left(528 + \frac{75 \cdot 528}{1123} \right) \cdot \frac{1}{3 \cdot 72,2^2} = 0,0358$ Ω, $r_k = 25,4 + 0,0358 \cdot 25^2 = 25,4 + 22,3 = 47,7$ Ω.
61	Величиной $P_{кд}$ для малых трансформаторов можно пренебречь.

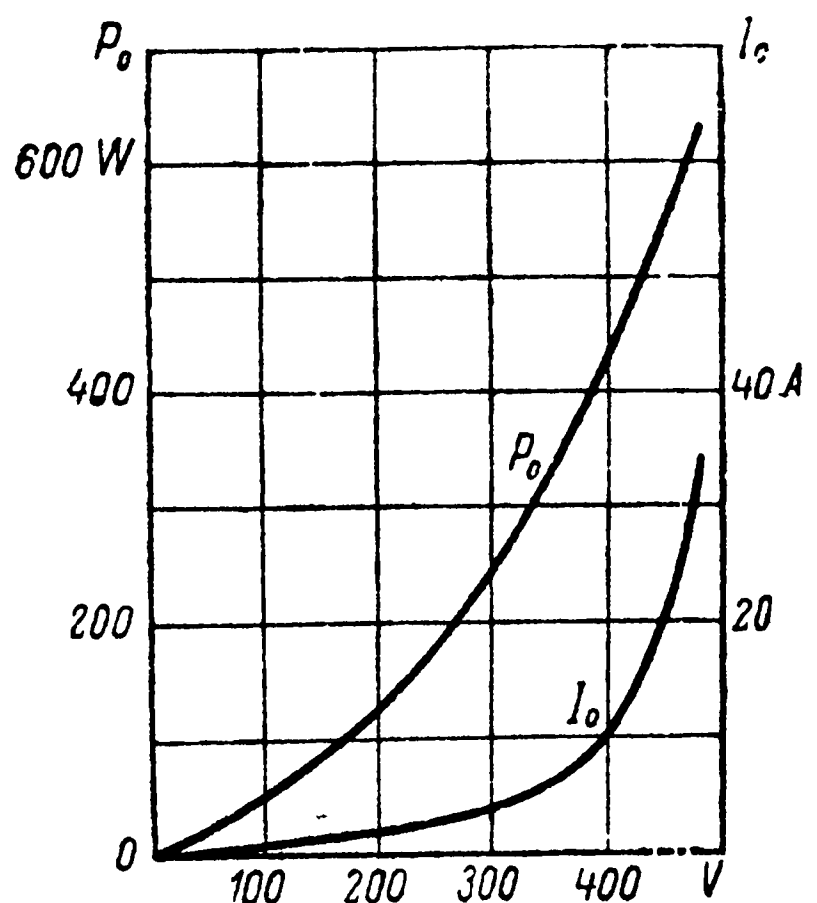


Рис. 211. Кривые холостого хода.

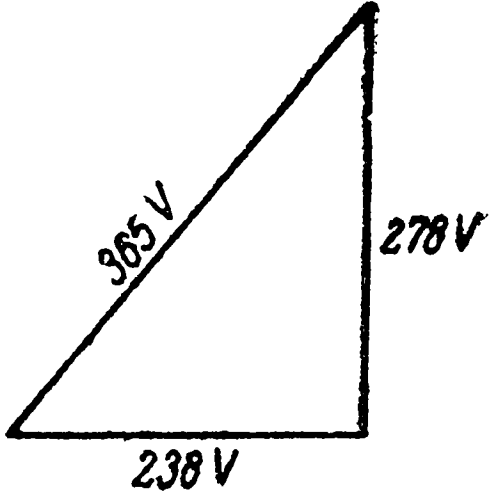
Пунк- ты	Расчетные формулы											
62	$P_k = 1123 + 75 = 1198 \text{ W}$; по данным каталога Бергмана 1250 W .											
63	$P_\Sigma = 1198 + 425 = 1623 \text{ W} = 1,623 \text{ kW}$. Согласно п. 6 $P_\Sigma = 1655 \text{ W}$.											
64	Для $\cos \varphi_2 = 1$ $\eta_{1/1} = 100 - \frac{1623 \cdot 100}{51\,623} = 96,87\%$ для $\cos \varphi_2 = 0,8$ $\eta_{1/1} = 100 - \frac{1623 \cdot 100}{41\,623} = 96,1\%$											
65	Кривые потерь и к. п. д. см. табл. 48 и рис. 212.											
66	$\xi = \frac{425}{1198} = 0,356$; согласно п. 7 $\xi = 0,33$.											
67	Холостой ход трансформатора											
	Ампервитки при номинальном напряжении. <table><tr><td>Для крайних фаз:</td><td>Для средней фазы:</td></tr><tr><td>Стержни . $37 \cdot 14,5 = 535$</td><td>555</td></tr><tr><td>Ярма . . $54,2 \cdot 3,25 = 176$</td><td>—</td></tr><tr><td>2 зазора в ярме $2 \cdot 0,005 \cdot 10\,200 = 102$</td><td>—</td></tr><tr><td>1 зазор в стержне $1 \cdot 0,005 \cdot 13\,300 = 67$</td><td>67</td></tr><tr><td>Всего . 880</td><td>622</td></tr></table>	Для крайних фаз:	Для средней фазы:	Стержни . $37 \cdot 14,5 = 535$	555	Ярма . . $54,2 \cdot 3,25 = 176$	—	2 зазора в ярме $2 \cdot 0,005 \cdot 10\,200 = 102$	—	1 зазор в стержне $1 \cdot 0,005 \cdot 13\,300 = 67$	67	Всего . 880
Для крайних фаз:	Для средней фазы:											
Стержни . $37 \cdot 14,5 = 535$	555											
Ярма . . $54,2 \cdot 3,25 = 176$	—											
2 зазора в ярме $2 \cdot 0,005 \cdot 10\,200 = 102$	—											
1 зазор в стержне $1 \cdot 0,005 \cdot 13\,300 = 67$	67											
Всего . 880	622											

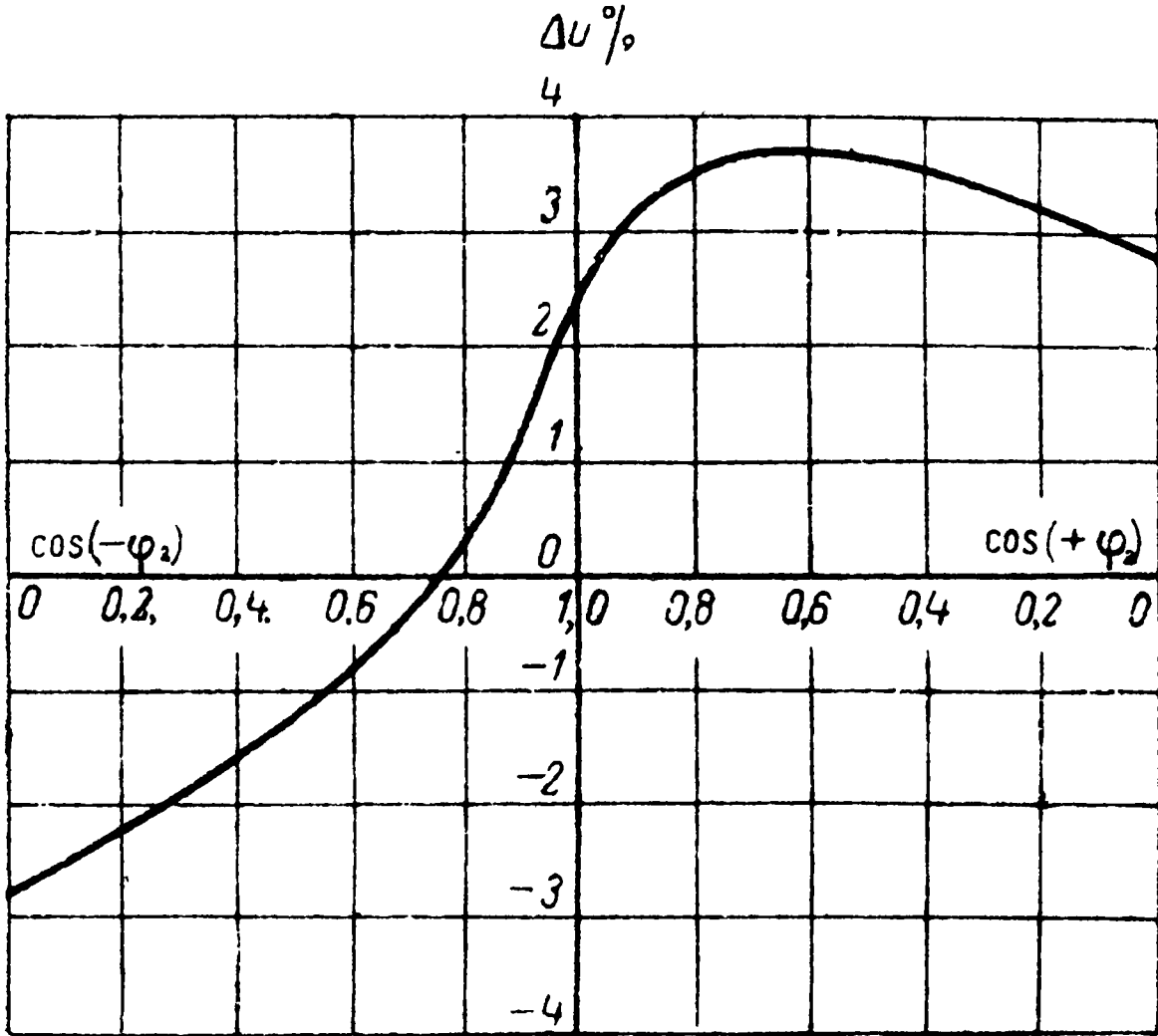
Рис. 212. Кривые потерь и к. п. д.: кривая 1 — $\eta_{1/1}$ при $\cos \varphi_2 = 1$; кривая 2 — $\eta_{1/1}$ при $\cos \varphi_2 = 0,8$.

Таблица 48

Нагрузка в частях (x) от номинальной	1/4	1/2	3/4	1/1	5/4
P_c (W)	425	425	425	425	425
P_k (W)	75	299	673	1 198	1 865
P_Σ (W)	500	724	1 098	1 623	2 290
$\cos \varphi_2 = 1$ { xP . . . (kVA)	12,5	25	37,5	50	62,5
$\cos \varphi_2 = 1$ { η_x (%)	96,15	97,20	97,16	96,87	96,48
$\cos \varphi_2 = 0,8$ { $xP \cos \varphi_2$ (kW)	10	20	30	40	50
$\cos \varphi_2 = 0,8$ { η_x (%)	95,24	96,52	96,48	96,1	95,60

Пунк- ты	Расчетные формулы																																																																																			
68	Среднее для трех фаз значение намагничивающих ампервитков составляет $\frac{2 \cdot 880 + 622}{3} = 795$ ампервитков.																																																																																			
	Среднее значение реактивной составляющей тока холостого хода при $U_2 = 400$ V будет равно: $I_{op} = \frac{795}{\sqrt{2} \cdot 74} = 7,6$ A.																																																																																			
	Поправка на высшие гармоники (§ 66) отпадает.																																																																																			
	Среднее значение активной составляющей тока холостого хода:																																																																																			
	$I_{oa} = \frac{425}{400 \cdot \sqrt{3}} = 0,615$ A.																																																																																			
	Полный ток холостого хода: $I_o = \sqrt{7,60^2 + 0,615^2} = 7,62$ A.																																																																																			
	Процентное значение тока холостого хода: $i_o = \frac{7,62 \cdot 100}{72,2} = 10,5\%$.																																																																																			
	Аналогичным образом находят значения токов холостого хода и для других напряжений и строят кривую $I_o = f_2(U)$ (табл. 49 и рис. 211) и потерь $P_o = f_1(U)$.																																																																																			
	Т а б л и ц а 49																																																																																			
	Потери и токи холостого хода																																																																																			
	<table><tr><th>U_2 (V)</th><th>160</th><th>240</th><th>320</th><th>400</th><th>480</th></tr><tr><td>B (Gs)</td><td>5 300</td><td>7 950</td><td>10 600</td><td>13 300</td><td>15 900</td></tr><tr><td>$B_{я}$ (Gs)</td><td>4 080</td><td>6 100</td><td>8 150</td><td>10 200</td><td>12 250</td></tr><tr><td>v (W/kG)</td><td>0,5</td><td>0,9</td><td>1,5</td><td>2,5</td><td>3,9</td></tr><tr><td>$v_{я}$ (W/kG)</td><td>0,32</td><td>0,6</td><td>0,94</td><td>1,35</td><td>2,1</td></tr><tr><td>Потери в стержн. (W)</td><td>50</td><td>90</td><td>151</td><td>251</td><td>385</td></tr><tr><td>„ „ ярмах. (W)</td><td>41</td><td>78</td><td>121</td><td>174</td><td>250</td></tr><tr><td>„ P_o (W)</td><td>91</td><td>178</td><td>272</td><td>425</td><td>635</td></tr><tr><td>$a\omega$ для стержней . .</td><td>0,8</td><td>1,55</td><td>3,8</td><td>15</td><td>67</td></tr><tr><td>$a\omega_{я}$ для ярем . . .</td><td>0,7</td><td>1,0</td><td>1,6</td><td>3,25</td><td>9</td></tr><tr><td>I_{oa} (A)</td><td>0,13</td><td>0,26</td><td>0,39</td><td>0,615</td><td>1,05</td></tr><tr><td>I_{op} (A)</td><td>1,04</td><td>1,67</td><td>2,04</td><td>7,6</td><td>25,1</td></tr><tr><td>I_o (A)</td><td>1,05</td><td>1,69</td><td>2,96</td><td>7,62</td><td>25,2</td></tr><tr><td>i_o (%)</td><td>1,45</td><td>2,3</td><td>4,1</td><td>10,5</td><td>34,6</td></tr></table>	U_2 (V)	160	240	320	400	480	B (Gs)	5 300	7 950	10 600	13 300	15 900	$B_{я}$ (Gs)	4 080	6 100	8 150	10 200	12 250	v (W/kG)	0,5	0,9	1,5	2,5	3,9	$v_{я}$ (W/kG)	0,32	0,6	0,94	1,35	2,1	Потери в стержн. (W)	50	90	151	251	385	„ „ ярмах. (W)	41	78	121	174	250	„ P_o (W)	91	178	272	425	635	$a\omega$ для стержней . .	0,8	1,55	3,8	15	67	$a\omega_{я}$ для ярем . . .	0,7	1,0	1,6	3,25	9	I_{oa} (A)	0,13	0,26	0,39	0,615	1,05	I_{op} (A)	1,04	1,67	2,04	7,6	25,1	I_o (A)	1,05	1,69	2,96	7,62	25,2	i_o (%)	1,45	2,3	4,1	10,5
U_2 (V)	160	240	320	400	480																																																																															
B (Gs)	5 300	7 950	10 600	13 300	15 900																																																																															
$B_{я}$ (Gs)	4 080	6 100	8 150	10 200	12 250																																																																															
v (W/kG)	0,5	0,9	1,5	2,5	3,9																																																																															
$v_{я}$ (W/kG)	0,32	0,6	0,94	1,35	2,1																																																																															
Потери в стержн. (W)	50	90	151	251	385																																																																															
„ „ ярмах. (W)	41	78	121	174	250																																																																															
„ P_o (W)	91	178	272	425	635																																																																															
$a\omega$ для стержней . .	0,8	1,55	3,8	15	67																																																																															
$a\omega_{я}$ для ярем . . .	0,7	1,0	1,6	3,25	9																																																																															
I_{oa} (A)	0,13	0,26	0,39	0,615	1,05																																																																															
I_{op} (A)	1,04	1,67	2,04	7,6	25,1																																																																															
I_o (A)	1,05	1,69	2,96	7,62	25,2																																																																															
i_o (%)	1,45	2,3	4,1	10,5	34,6																																																																															
69	Активная проводимость на фазу (среднее значение для трех фаз): $g_o = \frac{425}{3 \cdot 231^2} = 2,66 \cdot 10^{-3}$ S.																																																																																			
70	Полная проводимость на фазу (среднее значение для трех фаз): $y_o = \frac{7,62}{231} = 33 \cdot 10^{-3}$ S.																																																																																			
71	Реактивная проводимсть (среднее значение для трех фаз): $b_o \approx 32,9 \cdot 10^{-3}$ S.																																																																																			
72	$\cos \varphi_o = \frac{0,615}{7,62} = 0,081$.																																																																																			

Пунк- ты	Расчетные формулы
	Реактивность, напряжение короткого замыкания, треугольник короткого замыкания, изменение напряжения
73	$l_w = \frac{0,64 + 0,48}{2} = 0,56 \text{ м} = 56 \text{ см.}$
74	$\delta_s = 1,2 + \frac{0,8 + 1,9}{3} = 2,1 \text{ см (рис. 208).}$
75	$L = \frac{31 + 32}{2} = 31,5 \text{ см.}$
76	$K_R = 1 - \frac{0,8 + 1,9 + 1,2}{\pi \cdot 31,5} = 0,96.$
77	Несимметрия в середине обмотки при среднем числе витков будет составлять с учетом разрыва δ_p : $x = 5 + \frac{12 \cdot 100}{320} = 8,75\%, \text{ что дает по формуле (72):}$
78	$K_s = 1 + \frac{8,75}{200} \left(1 + \pi \cdot \frac{32}{2,1} \cdot \frac{8,75}{200} \right) = 1,136.$ $e_s = \frac{1,136 \cdot 8 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 56 \cdot 0,96 \cdot 2,1}{3 \cdot 3,13^2 \cdot 32} = 2,75\%.$
79	$x_k = \frac{2,75 \cdot 5780}{2,89 \cdot 100} = 55 \text{ } \Omega.$
80	$z_k = \sqrt{47,7^2 + 55^2} = 73 \text{ } \Omega.$
81	$e_r = \frac{47,7 \cdot 2,89 \cdot 100}{5780} = 2,39\%.$
82	$e_k = \sqrt{2,39^2 + 2,75^2} = 3,64\%; \text{ согласно заданию } e_k = 3,6\%.$
83	$\cos \varphi_k = \frac{2,39}{3,64} = 0,657.$
84	$r_k \cdot I_\phi \cdot \sqrt{3} = 47,7 \cdot 2,89 \cdot \sqrt{3} = 238 \text{ В,}$ $x_k \cdot I_\phi \cdot \sqrt{3} = 55 \cdot 2,89 \cdot \sqrt{3} = 278 \text{ В,}$ $z_k \cdot I_\phi \cdot \sqrt{3} = 73 \cdot 2,89 \cdot \sqrt{3} = 365 \text{ В.}$
	По этим значениям линейных величин строится треугольник короткого замыкания (рис. 213).
85	При $1/1$ нагрузки и $\cos \varphi_2 = 1$: $\Delta u_{\cos \varphi_2 = 1} = 2,39 + \frac{2,72^2}{200} = 2,43\%.$ При $1/1$ нагрузки и $\cos \varphi_2 = 0,8$ (отставание): $\Delta u_{\cos \varphi_2 = 0,8} = 2,39 \cdot 0,8 + 2,75 \cdot 0,6 +$ $+ \frac{(2,75 \cdot 0,8 - 2,39 \cdot 0,6)^2}{200} = 3,56\%.$
	
	Рис. 213. Треугольник короткого замыкания.

Пунк- ты	Расчетные формулы
86	Кривая рис. 214 дает изменение Δu при $1/1$ нагрузки в зависимости от $\cos \varphi_2$.  Рис. 214. Кривая $\Delta u = f(\cos \varphi_2)$ при $1/1$ нагрузки.
87—88	Расчеты электрической прочности для трансформатора сравнительно невысокого напряжения обычно не производятся. Тепловые расчеты Нагревание активной части трансформатора. 89 Для одного стержня потери¹ равны: $\frac{1,1 \cdot 89,5 \cdot 2,5}{3} = 82 \text{ W};$ поверхность охлаждения равна: $2 \cdot h \cdot l = 2 \cdot 0,124 \cdot 0,37 = 0,092 \text{ m}^2.$ Тогда согласно § 86: $q_c = 0,8 \frac{82}{0,092} = 715 \text{ W/m}^2$, т. е. сравнительно небольшая величина, для которой по кривой <i>b</i> рис. 150 будет $\tau_{II} = 8^\circ \text{ C}$. ¹ Потери берутся с запасом в 10%.

Пунк- ты	Расчетные формулы
90	Внутренний перепад по формуле (171): $\tau_I = \frac{7,6 \cdot 2,5 \cdot 1,1 \cdot 1,24^2}{2,5 \cdot 8} = 1,58^\circ\text{C.}^1$ Все величины отнесены к килограммам и дециметрам. Для обмотки (1): Потери $P_{m1} = 595 \cdot 1,065 = 635 \text{ W}$; поверхность охлаждения (считая только наружную): $O_{m1} = 3 \cdot \pi \cdot 0,225 \cdot 0,32 = 0,680 \text{ m}^2;$ $q_{m1} = \frac{635}{0,680} = 930 \text{ W/m}^2, \text{ что дает } \tau_{II} = 10^\circ\text{C}.$ Толщина изоляции между слоями: на самом проводе $\delta_u = 1,5 - 1,16 = 0,34 \text{ mm}$, добавочная прокладка $\delta'_u = 0,1 \text{ mm}$, число слоев $n = 12$. Тогда по формуле (176): $\tau_{Im} = 8,5 \cdot 2,74^2 \cdot 1,16 \cdot \frac{0,34 + 0,1}{2} \cdot \left(\frac{11}{10}\right)^2 = 19,8^\circ\text{C}, \quad \tau_I \approx 0,7 \cdot 19,8 = 13,9^\circ\text{C}.$
91	Для обмотки (2): Потери $P_{m2} = 1,065 \cdot 522 = 556 \text{ W}$; поверхность охлаждения (две цилиндрических поверхности на каждой фазе): $O_{m2} = 3 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot l_{w2} \cdot l_2 = 3 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot 0,48 \cdot 0,32 = 0,74 \text{ m}^2;$ $q_{m2} = \frac{556}{0,74} = 752 \text{ W/m}^2, \text{ что дает } \tau_{II} = 8,5^\circ\text{C}.$ Величина τ_I для этой обмотки сводится к перепаду в наружном слое изоляции толщиной $\frac{1}{2} \cdot 0,5 = 0,25 \text{ mm}$. Тогда по формуле (177): $\tau_I = \frac{0,0765 \cdot 0,025}{0,0015} \approx 1,3^\circ\text{C},$ где все приведено к сантиметрам.
92	$\tau_{III} \approx 3^\circ\text{C}.$
93	Р а с ч е т б а к а Очевидно, расчет следует вести, исходя из нагревания обмотки (1), которая будет нагреваться больше, чем обмотка (2). Примем среднюю ее температуру за $+69^\circ\text{C}$ (с запасом в 1°C против норм). Тогда: $\tau_{IV} = 69 - (13,9 + 10 + 3) \approx 42^\circ\text{C}.$
94	Размеры бака в плане определяются по эскизу активной части трансформатора, а именно: $A_\delta = 750 \text{ mm}$; $B_\delta = 340 \text{ mm}$. ¹ Потери берутся с запасом в 10%.

Пункты	Расчетные формулы								
95	Профиль волн (рис. 215) выбирается с размерами $h_{\delta}=115$ мм, $a_{\delta}=15$ мм, $b_{\delta}=45$ мм. С учетом углов бака, не используемых для размещения волн, всего поместится по широкой стороне 11 волн, а по узкой 5 волн. Тогда: $11(15+45)=660\text{ мм},\quad 750-660=90\text{ мм},$ $5(15+45)=300\text{ мм},\quad 340-300=40\text{ мм}.$								
96	Всего будет $2\cdot(11+5)=32$ волны. Коэффициент увеличения поверхности: $k=\frac{115+115+50}{60}=4,68$ где 50 мм вместо 60 мм взято с учетом закруглений волн.								
97	Для $\tau_{IV}=42^{\circ}\text{C}$ будет $K_{вл}=6,1+\frac{6,3}{4,68}\approx 7,45\frac{\text{W}}{\text{м}^2\cdot^{\circ}\text{C}}$ (см. табл. 37 и кривую d рис. 146).								
98	$q_{\delta}=42\cdot 7,45=313\text{ W/м}^2.$								
99	$O_{\delta}=\frac{1,1\cdot P_{\Sigma}}{313}=\frac{1,1\cdot 1623}{313}=5,7\text{ м}^2.$								
	Поверхность крышки составит около $0,6\text{ м}^2$; для стенок останется около $5,1\text{ м}^2$. Развернутый периметр составит из: <table><tr><td>32 волн</td><td>$32\cdot 0,280=8,95\text{ м}$</td></tr><tr><td>4 углов</td><td>$2\cdot(0,09+0,04)=0,26\text{ ,}$</td></tr><tr><td colspan="2"> </td></tr><tr><td>Всего</td><td>$9,21\text{ м}$</td></tr></table>	32 волн	$32\cdot 0,280=8,95\text{ м}$	4 углов	$2\cdot(0,09+0,04)=0,26\text{ ,}$			Всего	$9,21\text{ м}$
32 волн	$32\cdot 0,280=8,95\text{ м}$								
4 углов	$2\cdot(0,09+0,04)=0,26\text{ ,}$								
Всего	$9,21\text{ м}$								
100	Необходимая высота волн $H_{\delta}=\frac{5,1}{9,21}=0,551\text{ м}.$								
	В конструкции завода Бергман взято $H_{\delta}=625$ мм с учетом скоса волн сверху и снизу. Высота бака с крышкой 740 мм.								
101	Эскиз бака см. чертеж I в приложении.								
102	Точное значение $\tau_{III}=3^{\circ}\text{C}.$								
103	$\tau_{IVm}=1,35\tau_{IV}=1,35\cdot 42\approx 57^{\circ}\text{C}.$								
104	Распределение температур аналогично рис. 145 с соответствующими изменениями.								
105	$V_{\delta}\approx 6,5\cdot\left(7,5+2,3\cdot\frac{15}{45+15}\right)\cdot\left(3,4+2,3\cdot\frac{15}{45+15}\right)=208\text{ дм}^3.$ Вторыми слагаемыми в скобках учитывается объем волн.								

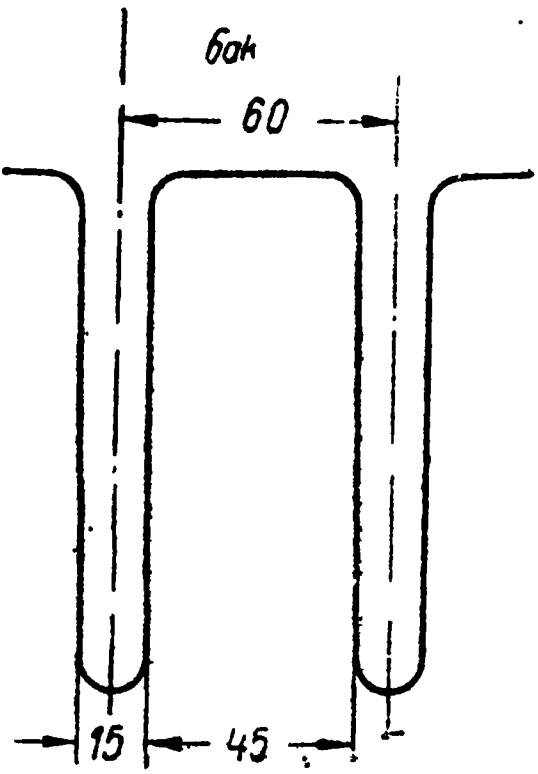


Рис. 215. Профиль волн бака.

Пунк- ты	Расчетные формулы																																																		
106	Вес бака составит из: <table><tr><td>Веса стенок</td><td>ок. 80</td><td>· 0,01 · 6</td><td>· 7,8 = 37,5 kG</td></tr><tr><td>Веса дна</td><td>ок. 7,5</td><td>· 3,4 · 0,03 · 7,8 = 6</td><td>„</td></tr><tr><td>Веса крышки</td><td>ок. 8,5</td><td>· 4,4 · 0,06 · 7,8 = 17,5</td><td>„</td></tr><tr><td>Фланцы и пр.</td><td></td><td></td><td>14 „</td></tr></table> Итого $G_{mp} = 75,0$ kG (все размеры в дециметрах).	Веса стенок	ок. 80	· 0,01 · 6	· 7,8 = 37,5 kG	Веса дна	ок. 7,5	· 3,4 · 0,03 · 7,8 = 6	„	Веса крышки	ок. 8,5	· 4,4 · 0,06 · 7,8 = 17,5	„	Фланцы и пр.			14 „																																		
Веса стенок	ок. 80	· 0,01 · 6	· 7,8 = 37,5 kG																																																
Веса дна	ок. 7,5	· 3,4 · 0,03 · 7,8 = 6	„																																																
Веса крышки	ок. 8,5	· 4,4 · 0,06 · 7,8 = 17,5	„																																																
Фланцы и пр.			14 „																																																
107	Объем выемной части трансформатора примерно будет равен $\frac{197,5 + 56,4}{6} = 42,3$ литра.																																																		
108	$V_{mc} = 208 - 42,3 = 165,7$ литров.																																																		
109	$G_{mc} = 0,9 \cdot 165,7 \approx 150$ kG.																																																		
110	Для вычисления величины T составляется следующая табл. 50. Т а б л и ц а 50 <table><tr><th>Наименование детали трансформатора</th><th>Вес kG</th><th>Теплоем- кости $\frac{Ws}{kG \cdot ^\circ C}$</th><th>Превы- шения темпера- туры $\tau_m ^\circ C$</th><th>$G \cdot c \cdot \tau_m$</th></tr><tr><td>Сердечник</td><td>197,5</td><td>490</td><td>70</td><td>$6,80 \cdot 10^6$</td></tr><tr><td>Обмотка</td><td>56,4</td><td>385</td><td>65</td><td>$1,41 \cdot 10^6$</td></tr><tr><td>Изоляция и дерево . .</td><td>25</td><td>2000</td><td>55</td><td>$2,75 \cdot 10^6$</td></tr><tr><td>Бак</td><td>75</td><td>490</td><td>30</td><td>$1,10 \cdot 10^6$</td></tr><tr><td>Масло</td><td>150</td><td>1800</td><td>50</td><td>$13,50 \cdot 10^6$</td></tr><tr><td>Конструктивные части</td><td>26</td><td>490</td><td>50</td><td>$0,64 \cdot 10^6$</td></tr><tr><td>Переключатель</td><td>5</td><td>385</td><td>50</td><td>$0,10 \cdot 10^6$</td></tr><tr><td>Изоляторы</td><td>10</td><td>—</td><td>—</td><td>—</td></tr><tr><td>Итого ок. . .</td><td>545</td><td>—</td><td>—</td><td>$26,30 \cdot 10^6$</td></tr></table> $T = \frac{26,3 \cdot 10^6}{1623 \cdot 3600} = 4,5 \text{ часа,}$ $T_m \approx \frac{70 \cdot (54,4 \cdot 385 + 0,7 \cdot 3,3 \cdot 2000)}{1198 \cdot 60} = 24,8 \text{ мин.}$	Наименование детали трансформатора	Вес kG	Теплоем- кости $\frac{Ws}{kG \cdot ^\circ C}$	Превы- шения темпера- туры $\tau_m ^\circ C$	$G \cdot c \cdot \tau_m$	Сердечник	197,5	490	70	$6,80 \cdot 10^6$	Обмотка	56,4	385	65	$1,41 \cdot 10^6$	Изоляция и дерево . .	25	2000	55	$2,75 \cdot 10^6$	Бак	75	490	30	$1,10 \cdot 10^6$	Масло	150	1800	50	$13,50 \cdot 10^6$	Конструктивные части	26	490	50	$0,64 \cdot 10^6$	Переключатель	5	385	50	$0,10 \cdot 10^6$	Изоляторы	10	—	—	—	Итого ок. . .	545	—	—	$26,30 \cdot 10^6$
Наименование детали трансформатора	Вес kG	Теплоем- кости $\frac{Ws}{kG \cdot ^\circ C}$	Превы- шения темпера- туры $\tau_m ^\circ C$	$G \cdot c \cdot \tau_m$																																															
Сердечник	197,5	490	70	$6,80 \cdot 10^6$																																															
Обмотка	56,4	385	65	$1,41 \cdot 10^6$																																															
Изоляция и дерево . .	25	2000	55	$2,75 \cdot 10^6$																																															
Бак	75	490	30	$1,10 \cdot 10^6$																																															
Масло	150	1800	50	$13,50 \cdot 10^6$																																															
Конструктивные части	26	490	50	$0,64 \cdot 10^6$																																															
Переключатель	5	385	50	$0,10 \cdot 10^6$																																															
Изоляторы	10	—	—	—																																															
Итого ок. . .	545	—	—	$26,30 \cdot 10^6$																																															
111	Графическое построение кривой нагревания для $1/1$ нагрузки см. рис. 172. Для определения значения T при $5/4$ нагрузки строим гиперболу: $T \cdot \tau_m^{\frac{1}{4}} = 4,5 \cdot 55^{\frac{1}{4}} = 12,3.$																																																		

Пункты	Расчетные формулы
112	Полные потери при $\frac{5}{4}$ нагрузки будут: $P_{\Sigma}' = 425 + 1198 \cdot \left(\frac{5}{4}\right)^2 = 2290 \text{ W.}$ По этому значению потерь, пользуясь гиперболой, находим для $\frac{5}{4}$ нагрузки: $\tau_{IV} = 72^\circ\text{C}$. Для обмотки (I) при $\frac{5}{4}$ нагрузки: $\tau_I' = \tau_I \cdot \left(\frac{5}{4}\right)^2 = 13,9 \cdot 1,56 = 21,7^\circ\text{C},$ $\tau_{II}' = \tau_{II} \cdot \left(\frac{5}{4}\right)^{1,6} = 10 \cdot 1,5 = 15^\circ\text{C}.$ Таким образом, даже при кратковременной перегрузке в 25% превышение температуры обмотки (I) над температурой масла составит $21,7 + 15 = 36,7^\circ\text{C}$ вместо прежних $13,9 + 10 = 23,9^\circ\text{C}$. Эти пункты к данному трансформатору не относятся.
113— —120	Механические расчеты
121	$e_s/e_r = 2,75/2,39 = 1,15; \quad \kappa^2 = 1,2 \text{ (рис. 192);}$ $F_r = 12,8 \cdot \left(\frac{2,89 \cdot 1942}{3,64}\right)^2 \cdot \frac{56}{32} \cdot 0,96 \cdot 1,2 \cdot 10^4 = 6120 \text{ kG.}$
122	$F_a = -\frac{6120 \cdot 2,1}{32} \approx -200 \text{ kG (сжимающая сила);}$ $F_x = \frac{1}{80} 6120 \cdot 8,75 \approx 675 \text{ kG.}$
123	На обмотку (I) будет действовать разрывающее усилие $-200 + 675 = 475 \text{ kG}$. На обмотку (2) будет действовать сжимающее усилие $-200 - 675 = -875 \text{ kG}$.
124	Обмотки имеют по концам по четыре опоры и расклиниваются от сердечника четырьмя круглыми клиньями.
125	$\sigma_1 = \frac{6120 \cdot 100}{2\pi \cdot 1942 \cdot 1,057} \approx 48 \text{ kG/cm}^2 \text{— величина, сравнительно ничтожная.}$
126	Для обмотки (2) площадь опор должна быть не менее $\frac{875}{100} = 8,75 \text{ cm}^2,$ что в данной конструкции обеспечено.
127	Крепление ярма сердечника — двумя деревянными планками, размерами $45 \times 90 \text{ mm}$, и четырьмя шпильками $\varnothing 18 \text{ mm}$.
128	Стенки бака толщиной 1 mm, крышка 6 mm, дно 3 mm; механический расчет таких малых баков обычно не производится.
129	Вес трансформатора без масла около 545 kG (п. 110), вес выемной части около $1,2 \cdot (56,4 + 197,5) = 305 \text{ kG}$.
130	См. чертеж I в приложении.
	Габаритные размеры трансформатора: в плане $560 \times 980 \text{ mm}$, высота с изоляторами 1135 mm.

§ 111. Пример 2. Расчет трехфазного трансформатора 50 kVA, 500/230 V, 50 Hz с естественным воздушным охлаждением

Задание

$m = 3; P = 50 \text{ kVA}; \text{ПКР} = 100\%; f = 50 \text{ Hz}.$
 $U_1/U_2 \approx E_1/E_2 = 500 \pm 5\%/230 = 194 - 167 - 141 - 115 \text{ V}.$
Группа соединений Y/Y₀ — 6.
Система охлаждения — естественное воздушное.
 $e_k = 3,6\%; \eta = 97,0\%.$

Основные электрические величины

Пунк- ты	Расчетные формулы
1	$U_{1\phi} = \frac{500}{\sqrt{3}} = 289 \text{ V}; U_{2\phi} = \frac{230}{\sqrt{3}} = 133 \text{ V}.$
2	$k_{12} = \frac{500}{\sqrt{3}} : \frac{230}{\sqrt{3}} = 2,17.$
3	$I_1 = \frac{50 \cdot 10^3}{500 \cdot \sqrt{3}} = 57,8 \text{ A}; I_2 = \frac{50 \cdot 10^3}{230 \cdot \sqrt{3}} = 125,5 \text{ A}.$
4	$I_{1\phi} = 57,8 \text{ A}; I_{2\phi} = 125,5 \text{ A}.$
5	Испытательные напряжения: для обмотки (1) 2000 V, для обмотки (2) 1500 V.

Оценка задания

Данный трансформатор является типичным низковольтным трансформатором с воздушным охлаждением и предназначен для питания приемников с широкой регулировкой напряжения (регулировка во вторичной обмотке с выводом ответвлений на клеммовую доску).

Тип трансформатора выбран стержневой с вертикальными стержнями и concentрическими обмотками.

Ввиду равенства мощностей и напряжений короткого замыкания у этого трансформатора и трансформатора примера 1 очень показательно их углубленное сравнение.

Предварительный расчет

Пунк- ты	Расчетные формулы
6	$P_{\Sigma} = \frac{100 - 97}{97} \cdot 50 \cdot 10^3 = 1550 \text{ W.}$
7	$\xi = 0,5.$
8	$P_0 = \frac{0,5}{1 + 0,5} \cdot 1550 = 517 \text{ W}; \quad k_0 = 1,15; \quad P_c = \frac{517}{1,15} = 449 \text{ W.}$
9	$P_k = \frac{1}{1 + 0,5} \cdot 1550 = 1033 \text{ W}; \quad k_k = 1,05; \quad P_{\text{ж}} = \frac{1033}{1,05} = 985 \text{ W.}$
10	$e_r = \frac{1033 \cdot 100}{50 \cdot 10^3} = 2,07\%.$
11	$e_s = \sqrt{3,6^2 - 2,07^2} = 2,95\%.$
12	Обмотки выбраны концентрические; каждая — из одной цилиндрической катушки. Ввиду большого количества ответвлений в обмотке (2) ее придется расположить снаружи. Внутреннюю, плохо охлаждающуюся, обмотку (1) придется разделить на два слоя каналом $12 \text{ mm} = 1,2 \text{ cm}$, а с учетом изоляции на проводе канал $\delta_1 = 1,25 \text{ cm}$. Число охлаждающих поверхностей этой обмотки надо считать 3, а не 4 ввиду непосредственной близости сердечника. Между обмотками (1) и (2) можно цилиндра не ставить, так как оба напряжения низкие.
13	Можно считать $q_1 \approx 250 \text{ W/m}^2$, а $q_2 \approx 400 \text{ W/m}^2$ как среднее для обеих поверхностей обмотки (2) — поверхности наружной и поверхности, обращенной к каналу.
14	$\Delta = \sqrt{1,7 \cdot 2,2} = 1,94 \text{ A/mm}^2$, где выбрано $\Delta_1 = 1,7 \text{ A/mm}^2$ для внутренней обмотки (1), охлаждающейся только через конвекцию, и $\Delta_2 = 2,2 \text{ A/mm}^2$ для наружной обмотки (2).
15	$G_{\text{ж}} = \frac{985}{2,4 \cdot 1,94^2} = 109 \text{ kG.}$
16	По кривым рис. 152 для $\Delta_2 = 2,2 \text{ A/mm}^2$ и однослойной обмотки при двух поверхностях охлаждения и $q_2 = 400 \text{ W/m}^2$ можно взять толщину катушки $a_2 = 9 \text{ mm} = 0,9 \text{ cm}$; $a_1 \approx 11 \text{ mm} = 1,1 \text{ cm}$ по тем же кривым (см. также табл. 45).
17	Размер δ_{12} определяется лишь условиями охлаждения, как всякий другой канал; выбирается $\delta_{12} = 12 \text{ mm} = 1,2 \text{ cm}$, а с учетом изоляции на проводах $1,25 \text{ cm}$.
18	$\delta_s = 1,25 + \frac{0,9 + 1,1}{3} + \frac{1,25}{4} = 2,23 \text{ cm (§ 53).}$
19	$l_w/L \approx 1,7.$
20	$K_R \approx 0,97.$
21	$K_s \approx 1,1$ при полной обмотке низшего напряжения.
22	$e_w = \sqrt{\frac{1,1 \cdot 8 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 2,23 \cdot 0,97 \cdot 1,7}{2,95 \cdot 3}} = 3,02 \frac{\text{V}}{\text{виток}}$ (число активных стержней $s = 3$).

Пункты	Расчетные формулы
23	$\Phi = \frac{3,02 \cdot 10^6}{2,22} = 1,36 \cdot 10^6 \text{ Мх.}$
24 25	Марка стали ЕС4А, толщина листов 0,35 mm. При воздушном охлаждении берем:
26	$B = 12\,000 \text{ Гс}; \quad k_{\text{я}} = 1,15; \quad B_{\text{я}} = \frac{12\,000}{1,15} = 10\,450 \text{ Гс.}$ Для $B = 12\,000 \text{ Гс}$ $v = 2 \text{ Вт/кГ}$, для $B_{\text{я}} = 10\,400 \text{ Гс}$ $v_{\text{я}} = 1,4 \text{ Вт/кГ}$.
	$v_{\text{ср}} = \frac{2 + 1,4}{2} = 1,7 \text{ Вт/кГ (индукции } B \text{ и } B_{\text{я}} \text{ близки между собой).}$
27	$G_c = \frac{449}{1,7} = 264 \text{ кГ.}$
28	$\psi = \frac{264}{109} = 2,42$ — отношение, нормальное для трансформаторов с воздушным охлаждением.
	$S = \frac{1,36 \cdot 10^6}{12\,000} = 113,5 \text{ см}^2.$
	По формуле (8):
29	$S = 0,35 \sqrt{\frac{50 \cdot 10^9 \cdot 2,42}{50 \cdot 11\,200 \cdot 1,94}} = 117 \text{ см}^2,$
	где 11 200 — среднее значение индукции в стержнях и ярмах.
	Из полученных величин берется среднее значение $S = 114 \text{ см}^2$.
30	Для получения больших каналов около стержня число ступеней стержня берется только 2. Тогда $k_{\text{о}} = 0,785$.
	При бумажной изоляции $k_c = 0,85$.
31	$d = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{114}{0,785 \cdot 0,85}} \approx 14,8 \text{ см} = 148 \text{ мм.}$
32	Выбирая $\delta_0 = 7,5 \text{ мм} = 0,75 \text{ см}$ и учитывая канал $\delta_1 = 12 \text{ мм} = 1,2 \text{ см}$ (п. 10), имеем:
	$d_1 = 148 + 2 \cdot 7,5 + 11 + 12 = 186 \text{ мм},$
	$d_2 = 148 + 2 \cdot 7,5 + 2 \cdot 11 + 2 \cdot 12 + 2 \cdot 12 + 9 = 242 \text{ мм} = 24,2 \text{ см},$
	$D = \frac{186 + 242}{2} = 214 \text{ мм.}$
33	$l_{\text{в}} = \pi \cdot 214 = 672 \text{ мм} = 67,2 \text{ см.}$
34	$L = \frac{672}{1,7} \approx 400 \text{ мм.}$
35	$l_0 = 20 \text{ мм.}$
36	$l = 400 + 2 \cdot 20 = 440 \text{ мм.}$
37	$l/d = 440/148 = 2,98$ — значение нормальное.
38	$\frac{G_c}{P} = \frac{264}{50} = 5,28 \frac{\text{кГ}}{\text{кВА}}; \quad \frac{G_{\text{ж}}}{P} = \frac{109}{50} = 2,18 \frac{\text{кГ}}{\text{кВА}}.$

Пунк-
ты

Расчетные формулы

39 $C_c = 1 \cdot 264 = 264$ руб.; $C_m = 2,7 \cdot 109 = 295$ руб.

40 Число опор 4.

41 Схему соединений обмоток см. на рис. 216 (все отводы выведены на одну клеммовую доску; переключатель — вне трансформатора).

Обмотка (2)

$$w_2 = \frac{133}{3,02} = 44 \text{ витка};$$

для линейных напряжений 194 — 167 — 141 — 115 V будет соответственно 37 — 32 — 27 — 22 витка. Из длины обмотки (400 mm) надо вычесть место, занимаемое разрывом $\delta_p = 5$ mm и ответвлениями (10 mm); последние можно разместить по двум разным образующим цилиндра обмотки. Тогда осевой размер провода с изоляцией:

$$\beta_{2u} = \frac{400 - (5 + 10)}{(44 + 1) \cdot 1,02} \approx 8,45 \text{ mm.}$$

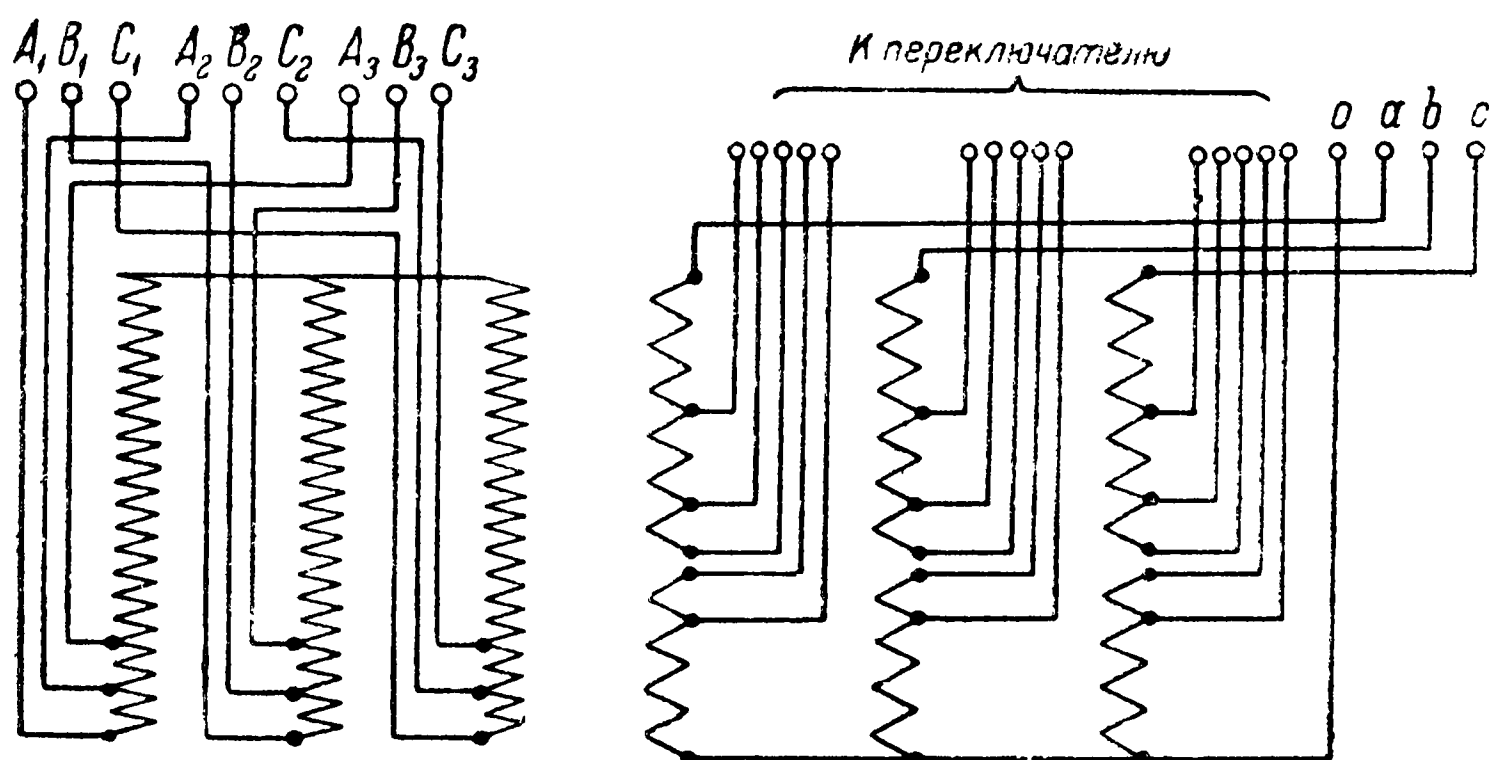


Рис. 216. Схема соединений обмоток.

Можно взять $\beta_2 = 8,45 - 0,5 \approx 8,0$ mm. При $\Delta_2 = 2,2$ A/mm² будет:

$$S_{m2} = \frac{125,5}{2,2} = 57 \text{ mm}^2.$$

Радиальный размер витка будет равен $\frac{57}{8} = 7,1$ mm.

Так как такого провода изолированного нет, виток составляется из двух проводов:

$$\frac{3,53 \times 8,0 \text{ mm (голый)}}{4,03 \times 8,5 \text{ mm (изолированный)}}$$

Марка провода ПББО.

Радиальный размер витка $2 \cdot 4,03 = 8,06$ mm, округляя, 8,0 mm. Сечение витка $2 \cdot 28,1 = 56,2$ mm².

$$\text{Окончательно } \Delta_2 = \frac{125,5}{56,2} = 2,24 \text{ A/mm}^2.$$

Пунк-
ты

Расчетные формулы

Обмотка (1)

$$w_1 = 44 \cdot \frac{500}{230} = 95 \text{ витков};$$

для напряжений 475 и 525 V будет соответственно 90 и 100 витков. 100 витков разместятся в двух слоях по 50 витков в каждом.

Осевой размер провода с изоляцией:

$$\beta_{1u} = \frac{400}{(50 + 1) \cdot 1,03} = 7,6 \text{ mm.}$$

Можно взять $\beta_1 = 6,9 \text{ mm}$.

При $\Delta_1 = 1,7 \text{ A/mm}^2$ сечение $S_{m1} = \frac{57,8}{1,7} = 34 \text{ mm}^2$.

Выбирается провод:

$$\frac{5,1 \times 6,9 \text{ mm (голый)}}{5,6 \times 7,4 \text{ mm (изолированный)}}^*$$

Сечение провода 35 mm^2 . Радиальный размер обмотки $a_1 = 2 \cdot 5,6 = 11,2 \text{ mm}$, причем между обоими слоями делается канал $\delta_1 = 12 \text{ mm}$.

Окончательно $\Delta_1 = \frac{57,8}{35} = 1,67 \text{ A/mm}^2$.

42

Ввиду сравнительной простоты обмотки таблица, подобная табл. 46, не приводится. Обе обмотки — левые.

Подсчет диаметров и радиальных размеров (рис. 217).

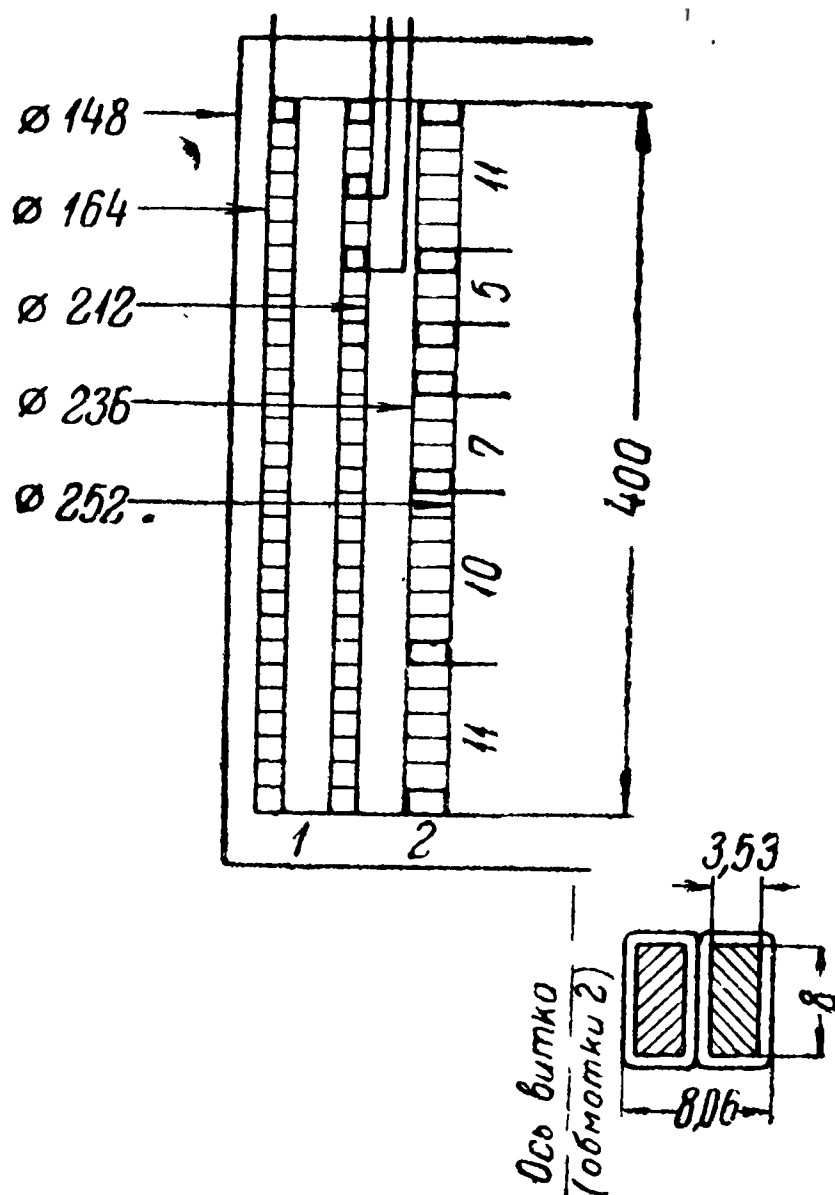


Рис. 217. Эскиз обмоток (цифры вдоль обмотки 2 — числа витков).

$$\begin{aligned} d &= 148 \text{ mm} \\ 2\delta_0 &= 16 \text{ "} \\ \hline d'_1 &= 164 \text{ "} \\ 2(a_1 + \delta_1) &= 48 \text{ "} \\ \hline d''_1 &= 212 \text{ "} \\ 2\delta_{12} &= 24 \text{ "} \\ \hline d''_2 &= 236 \text{ "} \\ 2a_2 &= 16 \text{ "} \\ \hline d''_2 &= 252 \text{ "} \\ \delta_a &= 18 \text{ "} \\ \hline c &= 270 \text{ mm} \\ l_{w1} &= \pi \cdot \frac{d'_1 + d''_1}{2} = \\ &= \pi \cdot \frac{0,164 + 0,212}{2} = 0,59 \text{ m,} \\ l_{w2} &= \pi \cdot \frac{d'_2 + d''_2}{2} = \\ &= \pi \cdot \frac{0,236 + 0,252}{2} = 0,77 \text{ m,} \\ l_w &= \frac{0,59 + 0,77}{2} = 0,68 \text{ m.} \end{aligned}$$

Пунк- ты	Расчетные формулы
	$G_{ж1} = 3 \cdot 100 \cdot 0,59 \cdot 35 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 55 \text{ kG}$ $G_{ж2} = 3 \cdot 44 \cdot 0,77 \cdot 56,2 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 51 \text{ „}$ $\text{Общий вес меди } G_{ж} \dots = 106 \text{ kG}$ (согласно п. 15 предварительного расчета 109 kG).

Окончательный расчет

Пунк- ты	Расчетные формулы
	Сердечник
43	$b_1 = 0,85 \cdot 148 = 126 \text{ mm}, \quad b_2 = 0,52 \cdot 148 = 77 \text{ mm}$ (берется 76 mm, как четное число), $h = 126 \text{ mm}, \quad b_{я} = 122 \text{ mm}$ (рис. 218).
44	$S = 2 \cdot (12,6 \cdot 3,8 + 7,6 \cdot 2,5) \cdot 0,85 = 114 \text{ cm}^2,$ $S_{я} = 12,6 \cdot 12,2 \cdot 0,85 = 130,5 \text{ cm}^2.$
45	$k_{я} = \frac{130,5}{114} = 1,145.$
46	$e_w = \frac{133}{44} = 3,02 \frac{\text{V}}{\text{ВИТОК}}.$
47	$B = \frac{3,02 \cdot 10^6}{2,22 \cdot 114} = 11\,950 \text{ Gs},$ $B_{я} = \frac{11\,950}{1,145} = 10\,450 \text{ Gs}.$
48	$c = 270 \text{ mm}, \quad a = 270 - 148 = 122 \text{ mm}.$
49	Активный объем ярем равен: $2 (2 \cdot S_{я} \cdot c + S \cdot b_{я}) = 2 (2 \cdot 1,305 \cdot 2,7 + 1,14 \cdot 1,22) = 16,9 \text{ dm}^3$ (§ 34); здесь все размеры в дециметрах.
50	Вес стержней $\dots \dots \dots 3 \cdot 4,4 \cdot 1,14 \cdot 7,6 = 114,5 \text{ kG}$ Вес ярем $\dots \dots \dots 16,9 \cdot 7,6 = 129 \text{ „}$ Вес всего сердечника $G_c \dots \dots \dots = 243,5 \text{ kG}$

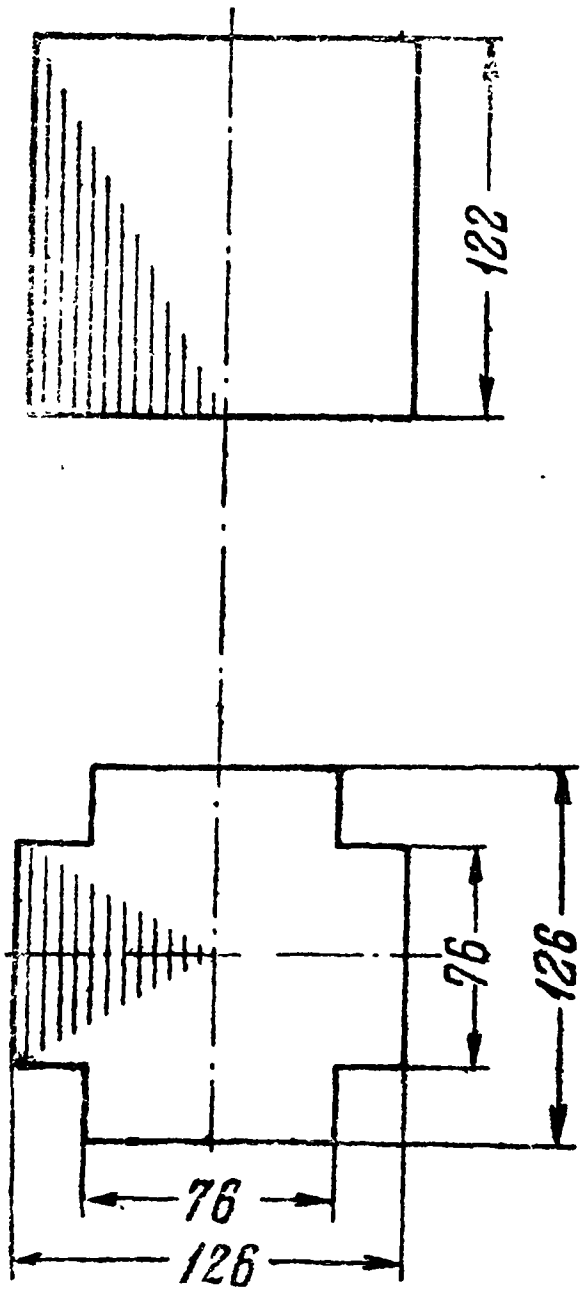


Рис. 218. Сечение стержня и ярем.

Пункты	Расчетные формулы
	Сердечник удалось спроектировать более легким, чем намечалось в предварительном расчете ($G_c = 264 \text{ kG}$).
51	$\psi = \frac{243,5}{106} = 2,3$; по предварительному расчету $\psi = 2,42$.
	Дальше расчет ведется согласно формуляру § 109 и соответствующим параграфам книги. Весь расчет целиком дальше не приводится.
56	Потери холостого хода:
	$P_0 = 1,15 \cdot (114,5 \cdot 2 + 129 \cdot 1,4) = 470 \text{ W}$.
58	Потери в меди:
	$P_{м1} = 2,4 \cdot 1,69^2 \cdot 52,4 = 358 \text{ W}$ (для среднего числа витков)
	$P_{м2} = 2,4 \cdot 2,24^2 \cdot 51,0 = 613 \text{ „}$
	$P_m = 971 \text{ W}$
62	$P_k \approx 1,05 \cdot 973 = 1020 \text{ W}$ (по кривым рис. 142).
63	$P_\Sigma = 1020 + 470 = 1490 \text{ W}$.
64	Для $\cos \varphi_2 = 1$ $\eta_{1/1} = 100 - \frac{1490 \cdot 100}{51 \cdot 490} = 97,1\%$ (против 97% по заданию).
73	$\delta_s = 1,25 + \frac{2 \cdot 0,51 + 2 \cdot 0,353}{3} + \frac{1,25}{4} = 2,13 \text{ cm}$.
74	$L = 400 \text{ mm} = 40 \text{ cm}$.
75	$K_R = 1 - \frac{2 \cdot 0,51 + 2 \cdot 0,353 + 1,25 + 1,25}{\pi \cdot 40} = 0,966$.
	При выключенных 5% витков обмотки (1) и полной обмотке (2) будет:
	$K_s = 1 + \frac{5}{200} \left(1 + \pi \cdot \frac{40}{2,13} \cdot \frac{5}{200} \right) = 1,062$;
	$e_s = \frac{1,062 \cdot 8 \cdot 50 \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 68 \cdot 0,966 \cdot 2,13}{3 \cdot 3,02^2 \cdot 40} = 1,062 \cdot 2,57 = 2,73\%$.
	При работе с $U_2 = 115 \text{ V}$ при выключенной наполовину обмотке (2) — в середине ее высоты — и при полной обмотке (1) будет:
	$K_s = 1 + \frac{50}{200} \left(1 + \pi \cdot \frac{40}{2,13} \cdot \frac{50}{200} \right) = 4,95$;
	$e_s = \frac{4,95 \cdot 2,73}{2} = 6,75\%$, так как мощность при этом снижается наполовину.
81	$e_r = \frac{1020 \cdot 100}{50 \cdot 10^3} = 2,04\%$.
82	$e_k = \sqrt{2,73^2 + 2,04^2} = 3,42\%$.

§ 112. Пример 3. Расчет однофазного трехобмоточного трансформатора 5000/3000/3000 кВА, $\frac{110}{\sqrt{3}}/\frac{33}{\sqrt{3}}/6,6$ кВ, 50 Hz с естественным масляным охлаждением

Задание

$$m = 1; \quad P_1 = 5000 \text{ кВА}, \quad P_2 = 3000 \text{ кВА}, \quad P_3 = 3000 \text{ кВА}; \quad \text{ПКР} = 100\%; \\ f = 50 \text{ Hz}.$$

$$U_1 = \frac{110\,000 \text{ В} - (4 \times 2^{1/2}\%) }{\sqrt{3}}, \quad U_2 = \frac{33\,000 \text{ В} \pm (2 \times 2^{1/2}\%) }{\sqrt{3}}, \quad U_3 = 6600 \text{ В}.$$

Переключатели на обмотках (1) и (2).
Охлаждение — естественное масляное.

$$e_{k12} = 9,5\%, \quad e_{k23} = 4,5\%, \quad e_{k13} = 14,5\%;$$

все значения приведены к мощности 5000 кВА.

$\eta = 98,8\%$ при работе обмоток: (1) — на 5000 кВА, (2) — на 3000 кВА, (3) — на 2000 кВА.
 $\tau_{\text{м}} = 65^{\circ}\text{C}$ по американским нормам.

Основные электрические величины

Пункты	Расчетные формулы
1	$U_{1\phi} = 63\,500 - 61\,912 - 60\,324 - 58\,736 - 57\,148 \text{ В},$ $U_{2\phi} = 20\,002 - 19\,526 - 19\,050 - 18\,574 - 18\,098 \text{ В},$ $U_{3\phi} = 6600 \text{ В}.$
2	$k_{12} = \frac{63\,500}{19\,050} = 3,33, \quad k_{13} = \frac{63\,500}{6600} = 9,61 \text{ на номинальных ступенях напряжения}.$
3	$I_1 = \frac{5000 \cdot 10^3}{63\,500 \cdot 0,95} = 82,5 \text{ А, считая по среднему напряжению};$ $I_2 = \frac{3000 \cdot 10^3}{19\,050} = 157,5 \text{ А, считая по среднему напряжению};$ $I_3 = \frac{3000 \cdot 10^3}{6600} = 454 \text{ А}.$

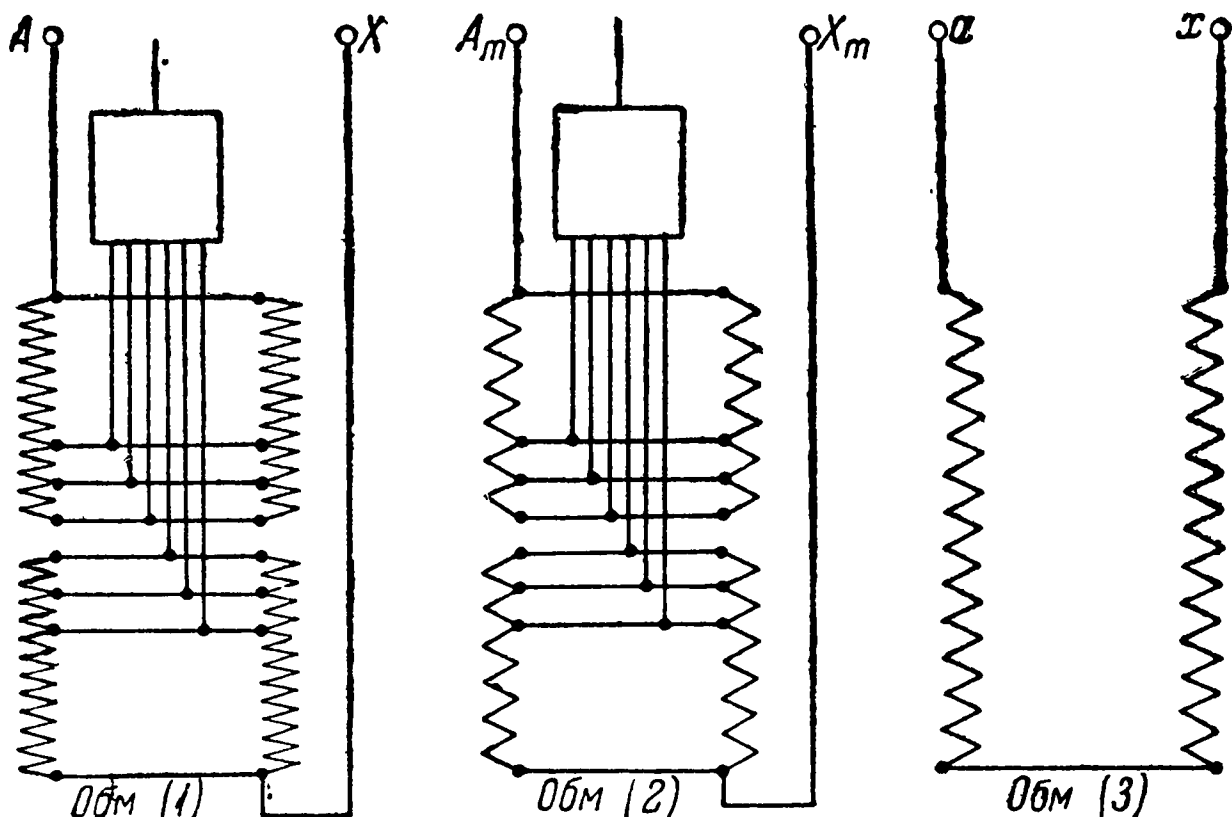
Пункты	Расчетные формулы							
4	Обмотки (1) и (2) соединены (рис. 219) параллельно на обоих стержнях для возможности обойтись всего двумя переключателями, по одному для каждой обмотки. Обмотка (3) соединена последовательно на обоих стержнях. Токи в обмотках каждого стержня равны: $I_{1\phi} = \frac{82,5}{2} = 41,5 \text{ А}, \quad I_{2\phi} = \frac{157,5}{2} = 78,8 \text{ А}, \quad I_{3\phi} = 454 \text{ А}.$ 							
Рис. 219. Схема соединений обмоток.								
5	Испытательные напряжения: <table> <tr> <td>для обмотки (1)</td> <td>231 kV</td> <td rowspan="3">} в течение 1 мин.</td> </tr> <tr> <td>" "</td> <td>(2) 67 kV</td> </tr> <tr> <td>" "</td> <td>(3) 21 kV</td> </tr> </table>	для обмотки (1)	231 kV	} в течение 1 мин.	" "	(2) 67 kV	" "	(3) 21 kV
для обмотки (1)	231 kV	} в течение 1 мин.						
" "	(2) 67 kV							
" "	(3) 21 kV							

Рис. 219. Схема соединений обмоток.

Оценка задания

Трансформатор принадлежит к числу сравнительно мощных и высоковольтных; он — трехобмоточный. Типовую мощность его можно считать равной:

$$P = \frac{5000 + 3000 + 3000}{2} = 5500 \text{ kVA}.$$

Тип трансформатора — стержневой с тремя concentрическими обмотками.

Согласно заданиям о напряжении короткого замыкания отдельных пар обмоток, а также принимая во внимание, что снаружи желательно всегда помещать обмотку с наивысшим напряжением, обмотки располагают по рис. 220. Тогда возможно соблюдение основного условия для трехобмоточных трансформаторов, а именно:

$$e_{s13} \approx e_{s12} + e_{s23}.$$

Конструкция трансформатора выбрана применительно к американским образцам с сравнительно небольшим использованием обмоток.

Предварительный расчет

Пункты	Расчетные формулы
6	$P_{\Sigma} = \frac{100 - 98,8}{98,8} \cdot 5000 \cdot 10^3 = 61\,000 \text{ W}$ при режиме работы, указанном в задании для η .
7	$\xi = 0,5$.
8	$P_0 = \frac{0,5}{1 + 0,5} 61\,000 = 20\,300 \text{ W}$; $k_0 = 1,05$ при хорошей обработке и последующей лакировке листов; $P_c = \frac{20\,300}{1,05} = 19\,300 \text{ W}$.
9	$P_k = \frac{1}{1 + 0,5} 61\,000 = 40\,700 \text{ W}$; $k_k = 1,1$; $P_m = \frac{40\,700}{1,1} = 37\,000 \text{ W}$. Коэффициентом k_k учитываются все добавочные потери при нагрузке.
10	$e_r = \frac{40\,700 \cdot 100}{5000 \cdot 10^3} = 0,815\%$.
11	Для обмоток 1—3 $e_{\Sigma 13} = \sqrt{14,5^2 - 0,815^2} \approx 14,5\%$.
12	Тип обмоток: обмотка (1) — из двойных дисковых катушек; обмотка (2) — непрерывная, из дисковых катушек (§ 48); обмотка (3) — винтовая (§ 49) ввиду сравнительно небольшого числа витков и значительного тока.
13	Величины q_m будут невелики, порядка 1000 W/m^2 , в соответствии с слабым использованием меди обмотки.
14	Плотности тока берутся около $2,7 \text{ A/mm}^2$ (см. оценку задания).
15	Формула неприменима в данном случае.
16	Из кривых рис. 152. видно, что для дисковых катушек, охлаждаемых (как в данном случае) с двух сторон и при $\Delta = 2,7 \text{ A/mm}^2$, размер β провода (толщина катушек) может достигать до $12,5 \text{ mm}$, причем величина q не превзойдет 1000 W/m^2 . Таким образом, охлаждение всех обмоток будет обеспечено при всех значениях β до $12,5 \text{ mm}$, а больше этот размер обычно и не выбирается.
17	Ориентировочные радиальные размеры обмоток (табл. 45) будут: $a_1 \approx 60 \text{ mm} = 6 \text{ cm}$, $a_2 \approx 25 \text{ mm} = 2,5 \text{ cm}$, $a_3 \approx 20 \text{ mm} = 2,0 \text{ cm}$. Промежутки между обмотками выбираются следующие: $\delta_{12} = 75 \text{ mm} = 7,5 \text{ cm}$; $\delta_{23} = 50 \text{ mm} = 5 \text{ cm}$ ввиду необходимости разместить отводы обмотки (2) в этом промежутке; $\delta_{13} = \delta_{23} + a_2 + \delta_{12} = 5 + 2,5 + 7,5 = 15 \text{ cm}$.

Пунк- ты	Расчетные формулы
18	$\delta_{s13} = 15 + \frac{6+2}{3} \approx 17,7 \text{ см.}$
19	$l_w/L = 1,5.$
20	$K_R \approx 0,95.$
21	$K_s \approx 1,1.$
22	$e_w = \sqrt{\frac{1,1 \cdot 8 \cdot 50 \cdot 5000 \cdot 10^{-3} \cdot 17,7 \cdot 1,5 \cdot 0,95}{14,5 \cdot 2}} = 43,7 \frac{\text{В}}{\text{ВИТОК}}$
	(число активных стержней $s = 2$).
23	$\Phi = \frac{43,7 \cdot 10^6}{2,22} = 19,7 \cdot 10^6 \text{ Мх.}$
24	Марка стали ЕС4А; толщина листов 0,5 mm.
25	$B = 13800 \text{ Gs}; \quad k_\pi = 1,1; \quad B_\pi = \frac{13800}{1,1} = 12600 \text{ Gs.}$
26	Для $B = 13800 \text{ Gs}$ $v = 3,2 \text{ W/kG}$, для $B_\pi = 12600 \text{ Gs}$ $v_\pi = 2,5 \text{ W/kG}$.
	$v_{cp} \approx 0,95 \frac{3,2 + 2,5}{2} = 2,72 \text{ W/kG.}$
27	$G_c = \frac{19300}{2,72} = 7100 \text{ kG.}$
28	См. окончательный расчет.
29	$S = \frac{19,7 \cdot 10^6}{13800} = 1430 \text{ см}^2.$
30	Сечение с каналами; $k_\emptyset = 0,82$. Изоляция листов — лак; $k_c = 0,92$.
31	$d = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{1430}{0,82 \cdot 0,92}} = 49,0 \text{ см} = 490 \text{ mm.}$
32	Принимая $\delta_0 = 25 \text{ mm}$ (канал у стержня 15 mm, цилиндр 5 mm и канал у обмотки 5 mm, имеем:
	$d_3 = 490 + 2 \cdot 25 + 20 = 560 \text{ mm},$
	$d_2 = 490 + 2 \cdot 25 + 2 \cdot 20 + 2 \cdot 50 + 25 = 705 \text{ mm},$
	$d_1 = 490 + 2 \cdot 25 + 2 \cdot 20 + 2 \cdot 50 + 2 \cdot 25 + 2 \cdot 75 + 60 = 940 \text{ mm.}$

Пункты	Расчетные формулы
	Средний диаметр обмоток (1) и (3) будет равен:
	$D_{13} = \frac{560 + 940}{2} = 750 \text{ mm.}$
33	$l_{w13} = \pi \cdot 750 = 2360 \text{ mm} = 236 \text{ cm.}$
34	$L = \frac{2360}{1,5} = 1575 \text{ mm.}$
35	$l_0 = 125 \text{ mm.}$
36	$l = 1575 + 250 = 1825 \text{ mm}$; в конструкции МТЗ размер взят 1775 mm, как и принято в дальнейшем.
37	$l/d = 1775/490 = 3,63.$
38	См. окончательный расчет.
39	Число опор выбирается равным 16.
40	Оптимальные размеры обмоток находятся после расчетов по двум-
41—42	трем вариантам.
	Обмотка (3) на 6600 V
	Тип обмотки — простая винтовая, причем на обоих стержнях
	левая. $w_3 = \frac{6600}{43,7} = 151,5$, взято 154 витка (по 77 витков на каждом
	стержне). Считая, что каналы между витками займут около $\frac{1}{3}$ высоты
	обмотки, для самой обмотки останется около $\frac{2}{3} \cdot 1480 = 985 \text{ mm}$. Тогда
	осевой размер β_3 витка будет равен около $\frac{985}{77} = 12,8 \text{ mm}$; есть размер про-
	вода 11,6 mm — голый и 12,1 mm — изолированный; марка ПББО.
	Так как обмотка (3) лежит ближе всего к стержню и плохо охла-
	ждается, то плотность тока Δ_3 берется меньше средней, а именно
	2,5 A/mm ² . Тогда $S_{м3} = \frac{454}{2,5} = 182 \text{ mm}^2$. Общий радиальный размер
	витка без изоляции будет около $\frac{182}{11,6} = 15,7 \text{ mm}$. Если взять шесть
	параллельных проводов, то радиальный размер каждого провода
	будет равен $\frac{15,7}{6} = 2,62 \text{ mm}$. Окончательно для витка берется 6 про-
	водов $\frac{2,63 \times 11,6 \text{ mm (голый)}}{3,13 \times 12 \text{ mm (изолированный)}}$; с учетом закругления в углах
	сечение $S_{м3} = 6 \cdot 30,3 = 181,5 \text{ mm}^2$.
	Радиальный размер витка с изоляцией $6 \cdot 3,13 = 18,7 \text{ mm}$, округляя,
	20 mm, осевой размер витка с изоляцией 12,2 mm.
	Транспозиции проводов делаются в обмотке каждого стержня:
	одна стандартная, по середине обмотки (после $38\frac{8}{16}$ витка ¹), и две
	специальные (после $19\frac{4}{16}$ и $57\frac{12}{16}$ витка). Нормальные каналы между
	витками по 6 mm. В середине обмотки — разгон витков, всего 120 mm.
	Для транспозиции — каналы по 25 mm.
	¹ При 16 опорах транспозиции можно делать только после целого
	числа шестнадцатых долей витка.

Пунк-
ты

Расчетные формулы

Подсчет осевых размеров смотки (3):

Обмотка	$77 \cdot 12,2 = 940$ mm
Нормальные каналы . . .	$[76 - (5 + 4 + 2)] \cdot 6 = 390$ „
2 верхних и 2 нижних канала	$4 \cdot 12 = 48$ „
2 канала для специальной транспозиции	$2 \cdot 25 = 50$ „
5 каналов в середине обмотки	120 „
Ярмовая изоляция	$2 \cdot 125 = 250$ „

Всего	1798 mm
Спрессовка — 23 „	
Окно l	1775 mm

Обмотка (2) на $\frac{33\,000}{\sqrt{3}}$ V

Обмотка непрерывная (§ 48) — на одном стержне левая, на другом правая; $w_2 = 154 \cdot \frac{33\,000}{6600 \cdot \sqrt{3}} = 444$ витка. Между ступенями регулировки будет $\frac{2,5}{100} \cdot 444 \approx 11$ витков. Число витков на отдельных ступенях регулировки будет 422—433—444—455—466.

Поскольку для обмотки (3) при 77 витках получился приемлемый осевой размер провода, можно в обмотке (2) взять 70 катушек, распределив 466 витков следующим образом:

3 начальных и 3 конечных катушки	$6 \cdot 5 = 30$ витков
56 промежуточных катушек	$56 \cdot 7 = 392$ „
8 регулирующих „	$8 \cdot 5\frac{1}{2} = 44$ „

Всего $w_2 = 466$ витков

Обмотка (2) будет заведомо иметь больше изоляции (начальные катушки) и большие каналы, чем обмотка (3); поэтому при 70 катушках осевой размер β_2 провода следует взять следующий меньший по сравнению с обмоткой (3), а именно 10,8 mm.

При $\Delta_2 = 2,8$ A/mm² $S_{\mu 2} = \frac{78,8}{2,8} = 28,2$ mm². $\frac{28,2}{10,8} = 2,62$ mm. Имеется провод $\frac{2,63 \times 10,8 \text{ mm (голый)}}{3,13 \times 11,3 \text{ mm (изолированный)}} \cdot S_{\mu 2} = 28,1$ mm² с учетом закругления в углах сечения.

3 начальных и 3 конечных катушки делаются из провода того же сечения, но с усиленной изоляцией ($3,93 \times 12,1$ mm).

$\Delta_2 = \frac{78,8}{28,1} = 2,81$ A/mm².

Радиальный размер катушек $a_2 = 7 \cdot 3,13 = 21,9$, округляя, 22 mm. Подсчет осевых размеров обмотки (2):

Обмотка	$\left\{ \begin{array}{l} 64 \cdot 11,3 = 724 \text{ mm} \\ 6 \cdot 12,1 = 72,6 \text{ „} \end{array} \right.$
Нормальные каналы	$60 \cdot 10 = 600$ „
4 верхних и 4 нижних канала	$8 \cdot 15 = 120$ „
1 средний канал („разрыв“)	30 „
Ярмовая изоляция	$2 \cdot 125 = 250$ „

Всего 1796,6 mm

Пунк-
ты

Расчетные формулы

Спрессовка —21,6 mm

Окно l 1775 mm

Обмотка (I) на $\frac{110\,000}{\sqrt{3}}$ V

$w_1 = 154 \cdot \frac{63\,500}{6600} = 1482$ витка. Между ответвлениями будет $\frac{2,5 \cdot 1482}{100} = 37$ витков. Числа витков по ступеням регулировки будут равны 1482—1445—1408—1371—1334.

Конструкция обмотки — из дисковых катушек с шайбами толщиной 2,0 mm между всеми катушками, а потому со сравнительно слабой изоляцией на самом проводе (для промежуточных катушек $\delta_u = 1,0$ mm, считая на обе стороны). По обе стороны шайбы — каналы (см. ниже).

Ввиду наличия шайб непрерывную обмотку выполнить нельзя; обмотка состоит из парных дисковых катушек (рис. 58).

Считая по 900 V на катушку, число катушек будет $\frac{63\,500}{900} = 70,5$; берутся 72 катушки.

Осовой размер провода β_1 можно наметить, считая, что сами провода займут около 40% высоты обмотки, т. е. $0,4 \cdot (1775 - 250) = 610$ mm.

Тогда $\beta_1 = \frac{610}{72} = 8,5$ mm.

Есть провод с размером 8,0 mm, на котором можно остановиться.

Так как $\beta_1 < \beta_2$ и $\beta_1 < \beta_3$, то можно взять $\Delta_1 \approx 2,9$ A/mm², несмотря на наличие большей изоляции на проводе обмотки (I).

Таким образом $S_{\text{м1}} = \frac{41,25}{2,9} = 14,25$ mm².

Для промежуточных катушек выбирается провод

$\frac{1,81 \times 8,0 \text{ mm (голый)}}{2,81 \times 9,0 \text{ mm (изолированный)}} \cdot S_{\text{м1}} \approx 14,3$ mm².

Начальные и конечные катушки добавочно изолируются кембриком (табл. 26), а поэтому для катушек I и II (см. там же) выбирается

провод большего сечения, а именно: $\frac{3,8 \times 10,0 \text{ mm (голый)}}{6,8 \times 13,0 \text{ mm (изолированный)}}$.

Разбивка витков по катушкам показана в табл. 51.

Т а б л и ц а 51

Обозначение катушек	Число катушек	Число витков в катушке	Общее число витков	Добавочная изоляция катушек mm	Примечания
I	2	6	12	6,5	1-я катушка от начала и от конца 2-я " " " " " 3-я и 4-я " " " " " Прочие промежуточные катушки Регулировочные катушки
II	2	7	14	3,5	
III	4	20	80	1,5	
IV	4	21	84	—	
V	52	22	1144	—	
VI	8	18½	148	—	
Итого	72		1482		

Пунк- ты	Расчетные формулы
	Радиальный размер катушек: Для катушек V $22 \cdot 2,81 = 61,8$, округляя, 62 mm " " I . . . $6,8 \cdot 6 + 2 \cdot 6,5 = 53,7$ " 54 " " " II . . . $6,8 \cdot 7 + 2 \cdot 3,5 = 54,5$ " 55 " Катушки I и II должны иметь меньший радиальный размер, так как внутри них помещаются угловые шайбы (чертеж IV в приложении). Подсчет осевого размера обмотки (I): 2 катушки I $2(13 + 2 \cdot 6,5) = 52$ mm 2 " II $2(13 + 2 \cdot 3,5) = 40$ " 4 " III $4(9 + 2 \cdot 1,5) = 48$ " 64 " IV + V + VI $64 \cdot 9 = 576$ " 71 шайба $\times 2,0$ $= 142$ " 4 канала $2 \cdot (7 + 9)^1 = 32$ " 4 " $2 \cdot (5 + 7)^1 = 24$ " 132 " $66 \cdot (3 + 6)^1 = 594$ " 1 канал — "разрыв" в середине $= 40$ " Ярмовая изоляция $2 \cdot 125 = 250$ " Всего 1798 mm Спрессовка —23 " Окно I 1775 mm Подсчет точных диаметров всех обмоток (рис. 220): $d = 490$ mm $2\delta_0 = 50$ " $d_3' = 540$ " $2a_3 = 40$ " $d_3'' = 580$ " $2\delta_{23} = 100$ " $d_2' = 680$ " $2a_2 = 44$ " $d_2'' = 724$ " $2\delta_{12} = 150$ " $d_1' = 874$ " $2a_1 = 124$ " $d_1'' = 998$ " $\delta_a = 42$ " $c = 1040$ "
	Рис. 220. Эскиз обмоток.
	1 По обе стороны каждой шайбы каналы разные; выше шайбы — меньший канал, ниже — больший (§ 87, п. 4).

Пунк- ты	Расчетные формулы																		
	Средние диаметры обмоток: $d_3 = \frac{540 + 580}{2} = 560 \text{ mm},$ $d_2 = \frac{680 + 724}{2} = 702 \text{ mm},$ $d_1 = \frac{874 + 998}{2} = 936 \text{ mm}.$ Средние длины витков: $l_{w3} = \pi \cdot 560 = 1755 \text{ mm} = 175,5 \text{ cm} = 1,755 \text{ m},$ $l_{w2} = \pi \cdot 702 = 2210 \text{ mm} = 221 \text{ cm} = 2,21 \text{ m},$ $l_{w1} = \pi \cdot 936 = 2940 \text{ mm} = 294 \text{ cm} = 2,94 \text{ m}.$ Вес обмоток: <table><tr><th></th><th>Без изоляции</th><th>С изоляцией</th></tr><tr><td>$G_{м1} = 2 \cdot 1456 \cdot 14,25 \cdot 2,94 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 1085 \text{ kG}$</td><td></td><td>1160 kG</td></tr><tr><td>$2 \cdot 26 \cdot 37,7 \cdot 3,04 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 53 \text{ „}$</td><td></td><td>73 „</td></tr><tr><td>$G_{м2} = 2 \cdot 466 \cdot 28,1 \cdot 2,21 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 512 \text{ „}$</td><td></td><td>535 „</td></tr><tr><td>$G_{м3} = 2 \cdot 77 \cdot 181,5 \cdot 1,775 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 435 \text{ „}$</td><td></td><td>460 „</td></tr><tr><td></td><td>$G_{м} = 2085 \text{ kG}$</td><td>2228 kG</td></tr></table>		Без изоляции	С изоляцией	$G_{м1} = 2 \cdot 1456 \cdot 14,25 \cdot 2,94 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 1085 \text{ kG}$		1160 kG	$2 \cdot 26 \cdot 37,7 \cdot 3,04 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 53 \text{ „}$		73 „	$G_{м2} = 2 \cdot 466 \cdot 28,1 \cdot 2,21 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 512 \text{ „}$		535 „	$G_{м3} = 2 \cdot 77 \cdot 181,5 \cdot 1,775 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 435 \text{ „}$		460 „		$G_{м} = 2085 \text{ kG}$	2228 kG
	Без изоляции	С изоляцией																	
$G_{м1} = 2 \cdot 1456 \cdot 14,25 \cdot 2,94 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 1085 \text{ kG}$		1160 kG																	
$2 \cdot 26 \cdot 37,7 \cdot 3,04 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 53 \text{ „}$		73 „																	
$G_{м2} = 2 \cdot 466 \cdot 28,1 \cdot 2,21 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 512 \text{ „}$		535 „																	
$G_{м3} = 2 \cdot 77 \cdot 181,5 \cdot 1,775 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 435 \text{ „}$		460 „																	
	$G_{м} = 2085 \text{ kG}$	2228 kG																	

Окончательный расчет

Пунк- ты	Расчетные формулы
43	Сечение стержня см. рис. 221b, сечение ярма см. рис. 221a.
44	Действительные сечения: $S = 1400 \text{ cm}^2; \quad S_{я} = 1530 \text{ cm}^2.$
45	$k_{я} = \frac{1530}{1400} = 1,095.$

Пунк- ты	Расчетные формулы
46	$e_w = \frac{6600}{154} = 42,9 \frac{\text{V}}{\text{ВИТОК}}.$
47	$B = \frac{42,9 \cdot 10^6}{2,22 \cdot 1400} = 13\,800 \text{ Gs}, \quad B_{\text{я}} = \frac{13\,800}{1,095} = 12\,650 \text{ Gs}.$
48	$c = 1040 \text{ mm},$
49	$a = 1040 - 490 = 550 \text{ mm}.$
50	При прямоугольной форме ярем и сборке внахлестку объем ярем равен $10,4 \cdot 15,3 +$ $+ 14 \cdot 4,32 = 224$ литра. Вес стержней $2 \cdot 17,75 \cdot 14 \cdot 7,6 = 3760 \text{ kG}$ Вес ярем $2 \cdot 224 \cdot 7,6 = 3400 \text{ „}$ $G_c = 7160 \text{ kG}$
51	По предварительному рас- чету $G_c = 7100 \text{ kG}.$ $\psi = \frac{7160}{2085} = 3,44$ — значение нормальное для высоковольт- ного трансформатора со сла- бым использованием обмоток.
52	Размеры отдельных дета- лей сердечника усматриваются из чертежа III в приложении.
53	$C_c = 1 \cdot 7160 = 7160 \text{ руб.};$ $C_{\text{м}} = 3,5 \cdot 2228 = 7800 \text{ руб.}$ [медь обмотки (I) с боль- шим количеством изоляции].
54	Рис. 221. a — сечение ярма; b — сечение стержня. $k_{\text{м}} = \frac{2(1482 \cdot 14,25 + 466 \cdot 28,1 + 77 \cdot 181,5)}{1775 \cdot 550} = 0,094.$
55	Потери и к. п. д. трансформатора При $B = 13\,800 \text{ Gs}$ $v = 3,2 \text{ W/kG},$ $B_{\text{я}} = 12\,650 \text{ Gs}$ $v_{\text{я}} = 2,5 \text{ W/kG}.$
56	$P_c = 3760 \cdot 3,2 + 3400 \cdot 2,5 = 20\,450 \text{ W}, \quad P_0 = 1,05 \cdot 20\,450 = 21\,400 \text{ W}$ (вместо $20\,300 \text{ W}$ по предварительному расчету).

Пункты	Расчетные формулы
57	Кривые потерь строятся аналогично примеру 1.
58	При нагрузках обмоток: (1) — на 5000 kVA, (2) — на 3000 kVA и (3) — на 2000 kVA плотности тока Δ_1 и Δ_2 будут как в п. 41, а $\Delta_3 = 2,5 \cdot \frac{2}{3} = 1,67$ A/mm².
	Потери в обмотках при работе на средних напряжениях обмоток (1) и (2) будут равны:
	$P_{\mu 1} = 2,4 \cdot 2,9^2 \cdot 1085 \cdot 0,95 = 20\,500$ W,
	$2,4 \cdot 1,09^2 \cdot 53 = 150$ W (потери в начальных катушках),
	$P_{\mu 2} = 2,4 \cdot 2,81^2 \cdot 510 \cdot 0,95 = 9200$ W,
	$P_{\mu 3} = 2,4 \cdot 1,67^2 \cdot 435 = 2800$ W.
59	Определение коэффициентов Фильда.
	Для обмотки (1):
	$\alpha'_1 = 2 \cdot \alpha_1 \sqrt{\frac{f \cdot \beta_l \cdot n_{l_1}}{l_s \cdot \rho \cdot 10^4}} = 2 \cdot 0,181 \cdot \sqrt{\frac{50 \cdot 0,8 \cdot 72}{161 \cdot 213}} = 0,106 \text{ см};$
	здесь $l_s = \frac{152,5}{0,95} = 161$ см.
	$K_{F1} = 1 + \frac{22^2 - 0,2}{9} \cdot (0,106)^4 = 1,0069.$
	Для обмотки (2):
	$\alpha'_2 = 2 \cdot 0,263 \cdot \sqrt{\frac{50 \cdot 1,08 \cdot 70}{161 \cdot 213}} = 0,176 \text{ см};$
	$K_{F2} = 1 + \frac{7^2 - 0,2}{9} \cdot (0,176)^4 = 1,0052.$
	Для обмотки (3):
	$\alpha'_3 = 2 \cdot 0,263 \cdot \sqrt{\frac{50 \cdot 1,16 \cdot 77}{161 \cdot 213}} = 0,19 \text{ см};$
	$K_{F3} = 1 + \frac{6^2 - 0,2}{9} \cdot (0,19)^4 = 1,0052.$
	Но так как при 6 проводах в витке выполненная транспозиция будет несовершенной (§ 49), то можно принять $K_{F3} = 1,008.$
	Тогда:
	$P_{\mu} = 1,0069 \cdot 20\,650 + 1,0052 \cdot 9200 + 1,008 \cdot 2800 = 32\,820$ W.
60	Сопротивления обмоток трехобмоточного трансформатора во избежание ошибок лучше вычислять не из величины потерь, а непосредственно. Для сопротивления полных обмоток при +75°C получится:
	$r_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{1456 \cdot 2,94}{14,25} + \frac{26 \cdot 3,04}{37,7} \right) \cdot 0,0175 \cdot 1,228 = 3,23 \text{ } \Omega,$
	$r_2 = \frac{1}{2} \frac{466 \cdot 2,21}{28,1} \cdot 0,0175 \cdot 1,228 = 0,392 \text{ } \Omega,$
	$r_3 = \frac{154 \cdot 1,775}{181,5} \cdot 0,0175 \cdot 1,228 = 0,0323 \text{ } \Omega.$

Пункты	Расчетные формулы
61	$P_{k\partial} = \frac{k_{\delta} \cdot e_s^2 \cdot (\Phi \cdot 10^{-6})^2 \cdot l_1^3 \cdot f}{p_{\delta} \cdot [l_1 + 2(R_{\delta} - R)]^2 \cdot 50} =$ $= \frac{1 \cdot 14,6^2 \cdot 19,2^2 \cdot 152,5^3 \cdot 50}{688 \cdot [152,5 + 2(83 - 37,4)]^2 \cdot 50} = 6850 \text{ W}$
	для наиболее неблагоприятного случая распределения нагрузок.
62	$P_k = 32\,820 + 6850 = 39\,670 \text{ W}$. Потерями в отводах пренебрегаем.
63	$P_{\Sigma} = 21\,400 + 39\,670 = 61\,070 \text{ W}$.
64	При $1/1$ нагрузки и $\cos\varphi_2 = 1$
	$\eta = 100 - \frac{61,07 \cdot 100}{5061,07} = 98,8\% \text{ — точно, согласно заданию.}$
65	Кривые строятся подобно примеру 1.
66	$\xi = \frac{21\,400}{39\,670} = 0,54$; согласно п. 7 предварительного расчета $\xi = 0,5$
	Дальше расчет ведется согласно формуляру. Остановимся только на расчете рассеяния и расчете поверхности охлаждения радиаторного бака.
	Для обмоток (1—3):
73	$l_w = \frac{294 + 175,5}{2} = 235 \text{ см.}$
74	$\delta_{s13} = 7,5 + 5,0 + 2,2 + \frac{2 + 6,2}{2} = 17,4 \text{ см.}$
75	$L = 152,5 \text{ см}$; $l_w/L = 1,54$.
76	$K_R = 1 - \frac{2 + 2,5 + 7,5 + 5 + 6,2}{\pi \cdot 152,5} = 0,9515.$
77	K_s определится следующими поправками:
	1) от наличия усиленной изоляции начальных катушек, которые на пространстве 124 мм, т. е. $\frac{124 \cdot 100}{1525} = 8,15\%$ высоты обмотки, со-
	держат всего $\frac{53 \cdot 100}{1482} = 3,58\%$ витков; несимметрия x' составляет $8,15 - 3,58 = 4,57\%$ витков с каждого конца обмотки;
	2) от выключаемых 5% витков в середине обмотки несимметрия составит всего $2\frac{1}{2}\%$, так как обмотка (3) имеет „разгон“ против выключаемых витков обмотки (1); от наличия „разрыва“ 40 мм посередине обмотки (1) добавится несимметрия в $\frac{40}{1525} \cdot 100 = 2,6\%$; всего будет $x'' = 2,5 + 2,6 = 5,1\%$.
	$K'_s = 1 + \frac{4,57}{200} \left(1 + \pi \cdot \frac{152,5}{17,4} \cdot \frac{4,57}{100} \right) = 1,05;$
	$K''_s = 1 + \frac{5,1}{200} \left(1 + \pi \cdot \frac{152,5}{17,4} \cdot \frac{5,1}{200} \right) = 1,043.$
	Общий $K_s \approx 1,1$.
78	$e_{s13} = 1,1 \cdot 8 \cdot 50 \cdot \frac{5000}{2} \cdot \frac{10^{-3}}{42,9^2} \cdot 1,54 \cdot 17,4 \cdot 0,9515 = 15,2\%.$

Пунк- ты	Расчетные формулы
	Для обмоток (2—3):
73	$l_{w23} = \frac{220 + 175,5}{2} \approx 198 \text{ см.}$
74	$\delta_{s23} = 5 + \frac{2 + 2,2}{3} = 6,4 \text{ см.}$
75	$L = 152,5 \text{ см.}$
76	$K_R = 1 - \frac{2 + 5 + 2,2}{\pi \cdot 152,5} = 0,988.$
77	Несимметрия равна $2\frac{1}{2}\%$ и от „разрыва“ 30 мм в обмотке (2) еще $\frac{30 \cdot 100}{1525} \approx 2\%$.
	$K_s \approx 1,05.$
78	$e_{s23} = 1,05 \cdot 4,35 = 4,57\%$, где $4,35\%$ — индуктивность симметричных обмоток 2—3.
	Для обмоток (1—2):
73	$l_{w12} = \frac{294 + 220}{2} = 257 \text{ см.}$
74	$\delta_{s12} = 7,5 + \frac{2,2 + 6,2}{3} \approx 10,3 \text{ см.}$
75	$L = 152,5 \text{ см.}$
76	$K_R = 1 - \frac{2,2 + 7,5 + 6,2}{\pi \cdot 152,5} = 0,967.$
77	Несимметрию примем такую же, как для обмоток (1—3), т. е. $K_s = 1,10$.
78	$e_{s12} = 1,10 \cdot 8,95 = 9,85\%$, где $8,95\%$ — индуктивность симметричных обмоток 1—2.
	Все значения e_s условно отнесены к мощности 5000 kVA; все они получились достаточно близкими к заданным. Если бы этого не получилось, пришлось бы изменить расстояния δ_{12} и δ_{23} , или даже внести большие изменения в расчет.
	Как известно из теории трехобмоточного трансформатора, для значений e_s , приведенных к одной мощности, существуют следующие соотношения:
	$e_{s1} = \frac{1}{2} (e_{s12} + e_{s13} - e_{s23}) = \frac{1}{2} (9,85 + 15,2 - 4,57) = 10,2\%,$
	$e_{s2} = \frac{1}{2} (e_{s12} + e_{s23} - e_{s13}) = \frac{1}{2} (9,85 + 4,57 - 15,2) = -0,39\%,$
	$e_{s3} = \frac{1}{2} (e_{s13} + e_{s23} - e_{s12}) = \frac{1}{2} (15,2 + 4,57 - 9,85) = 4,96\%.$
	Величина e_{s2} получилась отрицательной; в теории трехобмоточного трансформатора это называется „кажущейся емкостью“.

Пунк- ты	Расчетные формулы
93	Р а с ч е т б а к а По кривым рис. 152, при номинальных нагрузках каждой обмотки: $q_{м1} = 670 \text{ W/m}^2$, $q_{м2} = 810 \text{ W/m}^2$, $q_{м3} = 750 \text{ W/m}^2$, чему соответствуют по кривым рис. 150 значения $\tau_{II} = 10,5^\circ$, 12° и 11°C. Но поскольку половина каналов взята всего по 3 мм. будет осторожнее считать τ_{II} по формуле (169). Для обмотки (1): $\tau_{II} = 10 + \frac{3}{3} + \frac{6,2}{5,5} \left(\frac{670}{1000} \right)^{0,8} = 11,8^\circ\text{C}, \text{ округляя, } 12^\circ\text{C}.$ Наибольшее значение τ_I будет для обмотки (1), а именно: $\tau_I = \frac{0,1 \cdot 0,0670}{2 \cdot 0,0015} \approx 4,5^\circ\text{C} \text{ (все размеры в сантиметрах).}$ Тогда при: $\tau_{м} = 65^\circ\text{C} \text{ и } \tau_{III} = 3^\circ\text{C},$ $\tau_{IV} = 65 - (4,5 + 12 + 3) = 45,5^\circ\text{C},$ $\tau_{VI м} = 1,2 \cdot 45,5 = 54,5^\circ\text{C}.$ 94 Размеры бака в плане (овал): $A_\delta = 2500 \text{ мм}$, $B_\delta = 1660 \text{ мм}$, $H_\delta = 3800 \text{ мм}$; поверхность стенок бака 26 м^2, поверхность крышки $4,30 \text{ м}^2$. 95 Профиль радиаторов: $a_\delta = 15 \text{ мм}$, $b_\delta = 45 \text{ мм}$, $h_\delta = 240 \text{ мм}$ (см. чертеж III в приложении). 96 $k = \frac{240 + 240 + 50}{60} = 8,5.$ 97 Для $\tau_{IV} = 45,5^\circ\text{C}$ будет: $K \approx 6,2 + \frac{6,5}{8,5} \approx 6,9 \frac{\text{W}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$ 98 $q_\delta = 6,9 \cdot 45,5 = 315 \text{ W/m}^2.$ 99 Гладкие стенки самого бака и крышки будут отдавать: $6,2 + 6,5 = 12,7 \frac{\text{W}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}, \text{ а всего}$ $12,7 \cdot 45,5 \cdot (26 + 4,3) = 17\,500 \text{ W}.$ На долю радиаторов придется: $61\,070 - 17\,500 = 43\,570 \text{ W}.$ Поверхность радиаторов должна быть равной: $\frac{43\,570}{313} \approx 140 \text{ м}^2.$ Поставлено 8 стандартных радиаторов по $22,7 \text{ м}^2$.

§ 113. Пример 4. Расчет однофазного трансформатора 0,5 kVA, 500/230 V, 50 Hz с естественным воздушным охлаждением

Задание

$m = 1;$ $P = 0,5 \text{ kVA};$ $\text{ПКР} = 100\%;$ $f = 50 \text{ Hz}.$
 $U_1/U_2 \approx E_1/E_2 = 500/230 \text{ V}.$

Схема соединений — оба стержня последовательно для обоих напряжений.

Охлаждение — естественное воздушное.

e_k и η не заданы.

Основные электрические величины

Пункты	Расчетные формулы
1	$U_{1\phi} = \frac{500}{2} = 250 \text{ V}; \quad U_{2\phi} = \frac{230}{2} = 115 \text{ V}.$
2	$k_{12} = \frac{500}{230} = 2,17.$
3	$I_1 = \frac{0,5 \cdot 10^3}{500} = 1 \text{ A}; \quad I_2 = \frac{0,5 \cdot 10^3}{230} = 2,17 \text{ A}.$
4	$I_{1\phi} = 1 \text{ A}; \quad I_{2\phi} = 2,17 \text{ A}.$
5	Испытательные напряжения: для обмотки (1) 2000 V, для обмотки (2) 1500 V.

Оценка задания

Данный трансформатор принадлежит к числу мелких, с естественным воздушным охлаждением; рабочие напряжения — низкие.

Поэтому расчет можно вести упрощенным способом (§ 22, п. 5) с использованием лишь некоторых пунктов формуляра § 109. Тип — стержневой. Сечение стержней прямоугольное для простоты раскроя листов; обмотка на обоих стержнях.

Предварительный расчет

Пункты	Расчетные формулы
12	Обмотки — концентрические; обмотка высшего напряжения снаружи.
13	$q \approx 400 \text{ W/m}^2$ при воздушном охлаждении.
14	$\Delta \approx 1,5 \text{ A/mm}^2$.
17	$\delta_{12} = 2 \text{ mm}$ (пресшпановая гильза между обмотками).
24	Сталь выбирается марки ЕС4, толщиной 0,35 mm; изоляция — бумага.
25	$B \approx 9500 \text{ Gs}$.
28	$\psi \approx 2,0$.
29	$S = 0,6 \sqrt{\frac{0,5 \cdot 10^9 \cdot 2,0}{1,5 \cdot 9500 \cdot 50}} = 22,5 \text{ cm}^2$.
30	$k_c = 0,84$ (сборка без шпилек), $h/b = 2$, $S = h \cdot b \cdot k_c = 2 \cdot b^2 \cdot 0,84 = 22,5 \text{ cm}^2$, $b \approx 3,66 \text{ cm}$ (берется 36 mm), $h = 2 \cdot 3,66 = 7,32 \text{ cm}$ (берется 75 mm), $S = 3,6 \cdot 7,5 \cdot 0,84 = 22,7 \text{ cm}^2$, $k_a = 1,1$, $S_a = 1,1 \cdot 22,7 = 25,2 \text{ cm}^2$, $b_a = 1,1 \cdot 3,6 = 4,0 \text{ cm} = 40 \text{ mm}$, $B_a = \frac{9500}{1,1} = 8650 \text{ Gs}$, $\Phi = 22,7 \cdot 9500 = 0,216 \cdot 10^6 \text{ Mx}$, $e_w = 2,22 \cdot 0,216 = 0,48 \frac{\text{V}}{\text{виток}}$.
36	Длина стержней l определится так. Если бы сечение $S = 22,7 \text{ cm}^2$ было двухступенчатым, то ему соответствовал бы диаметр $d \approx 60 \text{ mm}$. Принимая $l/d = 2$, получаем $l = 2 \cdot 60 = 120 \text{ mm}$. При $l_0 = 5 \text{ mm}$, $l_2 = l - 2l_0 = 120 - 2 \cdot 5 = 110 \text{ mm}$.
41	Расчет обмоток Обмотка (2) на 230 V (внутренняя), $w_2 = \frac{230}{0,48} = 480$ витков. $S_{a2} = \frac{2,17}{1,5} = 1,45 \text{ mm}^2$; берем провод $\varnothing 1,35/1,60$ марки ПБД ввиду невысокого напряжения. По табл. 13 имеем $S_{a2} = 1,43 \text{ mm}^2$; $\Delta_2 = \frac{2,17}{1,43} = 1,52 \text{ A/mm}^2$. Витков вдоль оси (считая допуск 0,02 mm на толщину изоляции провода) будет $\frac{110}{1,62 \cdot 1,05} = 64$; на стержень придется взять $\frac{480}{2 \cdot 60} = 4$ слоя по 60 витков.

Пунк-
ты

Расчетные формулы

Между слоями — бумага толщиной 0,07 mm.

Радиальный размер $a_2 = 4 \cdot (1,62 + 0,07) \approx 7,0$ mm.

Обмотка (I) на 500 V (наружная), $w_1 = 480 \cdot \frac{500}{230} = 1044$ витка.

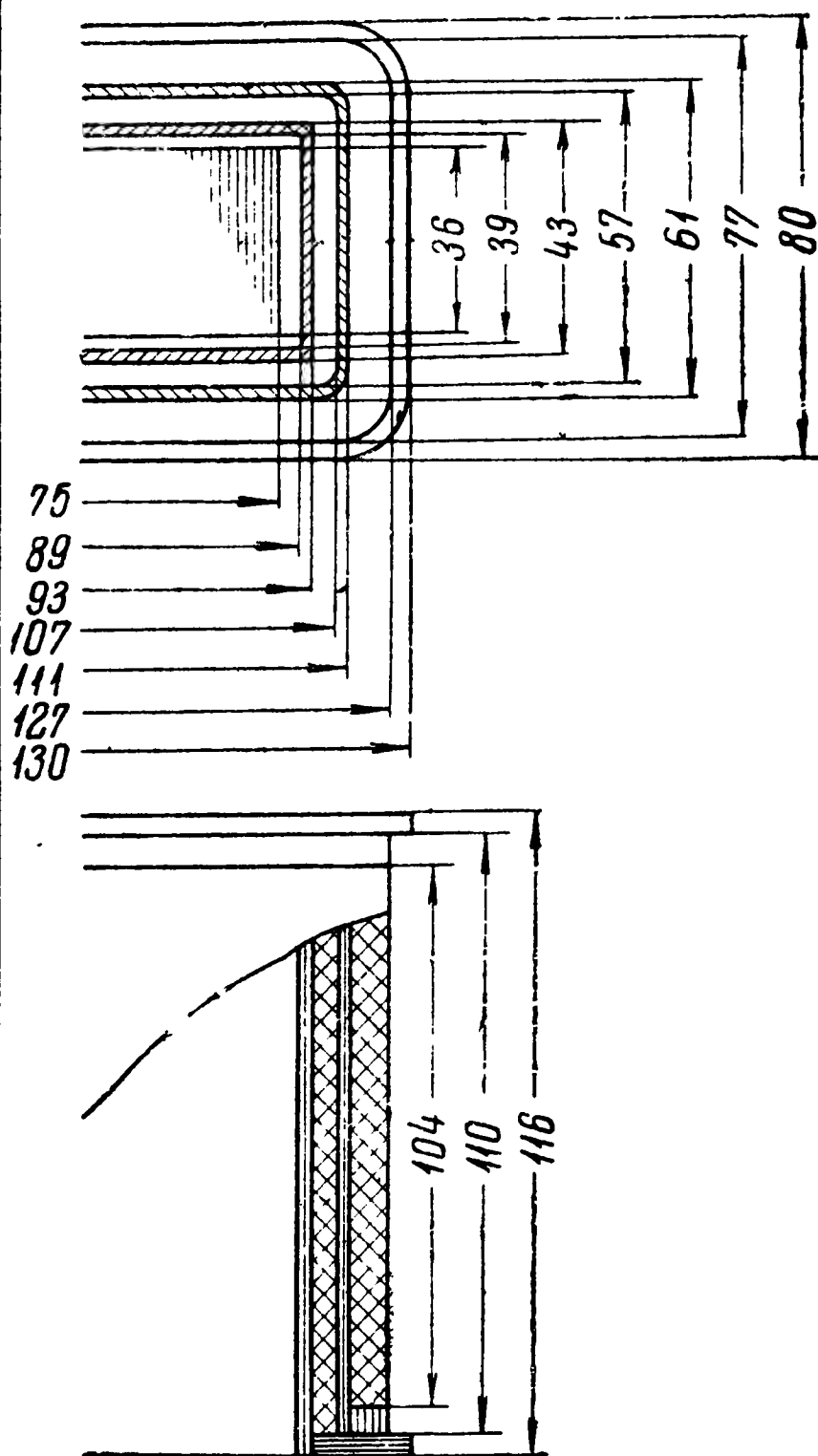


Рис. 222. Эскиз обмоток.

$S_{m1} = \frac{1}{1,5} = 0,667 \text{ mm}^2$, что соответствует проводу $\varnothing 0,92$.

Есть провод $\varnothing 0,93/1,13$ марки ПБД; для него $S_{m1} = 0,68 \text{ mm}^2$;

$$\Delta_1 = \frac{1,0}{0,68} = 1,47 \text{ A/mm}^2.$$

$$l_1 = 110 - 6 = 104 \text{ mm}$$

(рис. 222); $\frac{104}{1,13 \cdot 1,05} = 88$; можно взять 6 слоев по 87 витков. Тогда: $6 \cdot 87 = 522$ витка, а $2 \cdot 522 = 1044$ витка.

Между слоями — бумага толщиной 0,07 mm.

Радиальный размер $a_1 = 6 (1,15 + 0,07) = 7,35$ mm, округляя 8 mm.

Между обмотками — гильза толщиной 2,0 mm.

Ввиду необходимости вкладывать при сборке листы внутрь обмотки и затем пресовать их клином, до высоты $h = 75$ mm, размер оправки (и внутренней гильзы) берется равным 39×89 mm.

Размеры витков (рис. 222):

$$w_2 = 2 \cdot 35 + 2 \cdot 85 + 2\pi(2 + 2 + 3,5) = 287 \text{ mm} = 0,287 \text{ m},$$

$$l_{w1} = 2 \cdot 35 + 2 \cdot 85 + 2\pi(2 + 2 + 7 + 2 + 4) = 347 \text{ mm} = 0,347 \text{ m},$$

$$l_w = \frac{0,287 + 0,347}{2} = 0,317 \text{ m}.$$

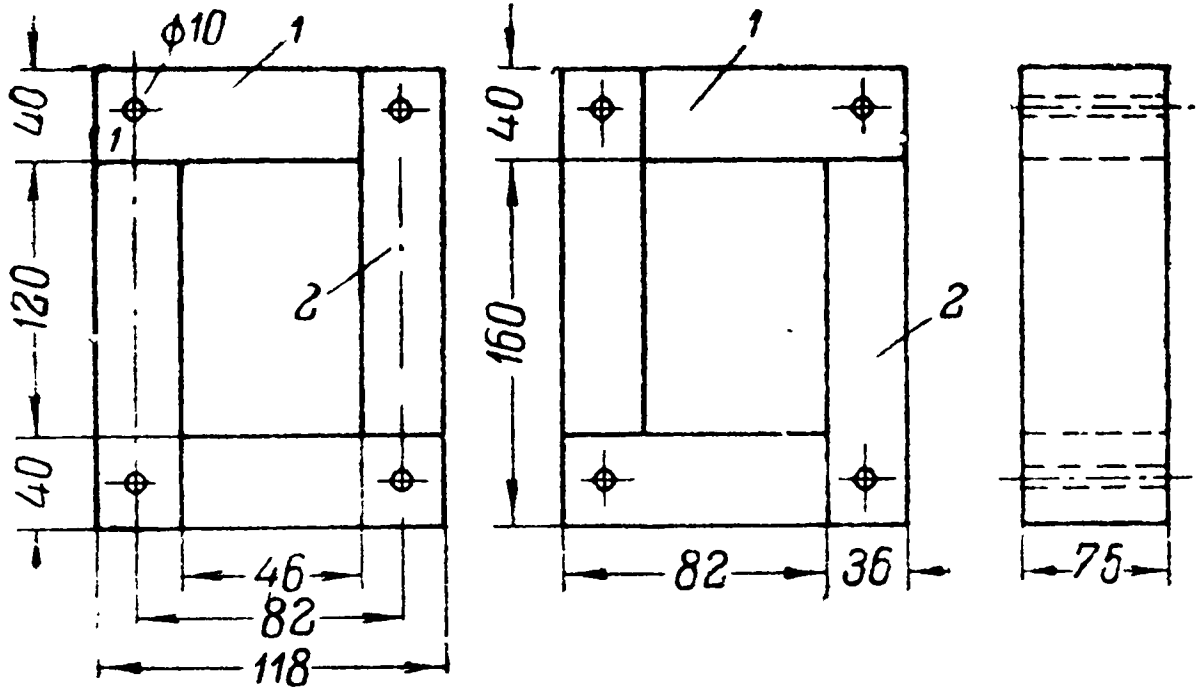
Вес меди (без изоляции):

$$G_{m2} = 2 \cdot 240 \cdot 0,287 \cdot 1,43 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 1,85 \text{ kG}$$

$$G_{m1} = 2 \cdot 522 \cdot 0,347 \cdot 0,68 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 2,2 \text{ „}$$

$$G_M = 4,05 \text{ kG}$$

Окончательный расчет

Пунк- ты	Расчетные формулы
43	См. рис. 223.
44—47	См. п. 30.
48	$\delta_a = 5 \text{ mm}; c = 77 + 5 = 82 \text{ mm}; a = 82 - 36 = 46 \text{ mm}.$
49	$l_{\text{я}} = 82 + 36 = 118 \text{ mm}.$
50	$G_c = 2 \cdot [1,2 \cdot 0,227 + 1,18 \cdot 0,252] \cdot 7,6 = 4,11 + 4,49 = 8,6 \text{ kG}.$
51	$\psi = \frac{8,6}{4,05} = 2,12.$
52	Число листов: деталь 1 $2 \cdot \frac{75 \cdot 0,84}{0,35} = 360$ листов, $40 \times 82 \text{ mm},$ деталь 2 360 листов, $36 \times 160 \text{ mm}.$ 
54	$k_{\text{ж}} = \frac{2 \cdot (480 \cdot 1,43 + 1044 \cdot 0,68)}{46 \cdot 120} = 0,505.$
55	Для $B = 9500 \text{ Gs}$ $v = 1,35 \text{ W/kG},$ для $B_{\text{я}} = 8650 \text{ Gs}$ $v_{\text{я}} = 1,1 \text{ W/kG}.$
56	$P_0 = 1,2 (4,11 \cdot 1,35 + 4,49 \cdot 1,1) = 12,6 \text{ W}.$

Пунк- ты	Расчетные формулы
57	Кривая потерь строится аналогично п. 57 примера 1 (§ 110).
58	$P_{м2} = 2,4 \cdot 1,52^2 \cdot 1,85 = 102, \text{ W}$ $P_{м1} = 2,4 \cdot 1,47^2 \cdot 2,2 = 11,3 \text{ „}$ $P_{м} = ... 21,5 \text{ W}$
59	$P_{м\partial} \approx 0.$
60	$r_1 = \frac{11,3}{1^2} = 11,3 \text{ }\Omega, \quad r_2 = \frac{10,2}{2,17^2} = 2,17 \text{ }\Omega;$ $r_k = 11,3 + 2,17 \cdot 2,17^2 = 11,3 + 10,2 = 21,5 \text{ }\Omega.$
61	$P_{k\partial} \approx 0.$
62	$P_k \approx P_{м} = 21,5 \text{ W.}$
63	$P_{\Sigma} = 12,6 + 21,5 = 34,1 \text{ W.}$
64	При $\cos \varphi_2 = 1$ $\eta_{1/1} = 100 - \frac{34,1 \cdot 100}{500 + 34,1} = 93,6\%.$
66	$\xi = \frac{12,6}{21,5} = 0,587.$
74	$\delta_s = 0,25 + \frac{0,7 + 0,735}{3} = 0,728 \text{ см.}$
75	$L = \frac{110 + 104}{2} = 107 \text{ mm} = 10,7 \text{ см.}$
76	$K_R = 1 - \frac{0,7 + 0,735 + 0,25}{\pi \cdot 10,7} = 0,962.$
77	$K_s = 1,0.$
78	$e_s = 8 \cdot 50 \cdot \frac{0,5}{2} \cdot \frac{10^{-3}}{0,48^2} \cdot \frac{31,7}{10,7} \cdot 0,962 \cdot 0,728 = 0,9\%.$
81	$e_r = \frac{21,5 \cdot 100}{500} = 4,3\%.$
82	$e_k = \sqrt{4,3^2 + 0,9^2} = 4,39\%.$

Сравнительные данные трансформаторов примеров 1 — 4 см. в табл. 52.

Сравнительные данные трансформаторов примеров 1—4 (частота 50 Hz)

№ примера	1	2	3	4
Число фаз m	3	3	1	1
Мощность P (kVA)	50	50	$\begin{cases} 5000 \\ 3000 \\ 3000 \end{cases}$	0,5
Напряжения U_1/U_2 (kV)	10/0,4	0,5/0,23	См. пример	0,5/0,23
Схема и группа соединения . . .	Y/Y ₀ —12	Y/Y ₀ —6	I/I—12 ¹	I/I—12 ¹
Система охлаждения	Ест. масл.	Ест. возд.	Ест. масл.	Ест. возд.
Напряжение короткого замыка- ния e_k (%)	3,64	3,42	См. пример	4,39
К. п. д. $\eta_{1/1}$ при $\cos \varphi_2 = 1$. . . (%)	96,87	97,1	98,8	93,6
Вес выемной части	305 kG	—	Ок. 12 t	—
Вес трансформатора без масла . .	545 „	440 kG	Ок. 19 t	Ок. 15 kG
Вес масла G_{mc}	165 „	—	Ок. 12 t	—
Сечение стержня S (cm ²)	106	114	1400	22,7
Индукция стержня B (Gs)	13 300	11 950	13 800	9500
Вес сердечника G_c (kG)	197,5	243,5	7160	8,6
Потери холостого хода P_0 . . (W)	425	470	21 400	12,6
e_w $\left(\frac{V}{\text{ВИТОК}}\right)$	3,12	3,02	42,9	0,48
Плотность тока Δ_1 (A/mm ²)	2,72	1,67	2,9	1,47
„ „ Δ_2 (A/mm ²)	3,22	2,24	2,81	1,52
„ „ Δ_3 (A/mm ²)	—	—	2,5	—
Вес меди G_m (kG)	54,7	106	2085	4,05
Потери короткого замыкания P_k (W)	1198	1020	39 670	21,5
$\xi = P_0/P_k =$	0,356	0,46	0,54	0,587
$\psi = G_c/G_m =$	3,6	2,3	3,44	2,12
G_c/P (kG/kVA)	3,95	4,89	1,43	17,2
G_m/P (kG/kVA)	1,1	2,12	0,42	8,1
$(G_{mp} + G_{mc})/P$ (kG/kVA)	13,9	8,8	6,2	30
e_r (%)	2,39	2,04	См. пример	4,3
e_s (%)	2,73	2,04	„	0,865
¹ См. стр. 347.				

ПРИНЯТЫЕ В КНИГЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

В основу принятых в расчетах и эскизах обозначений положены указания ОСТов 2690, 5579, 5580, 6052 и 6896.

Все величины и данные относятся к работе трансформаторов при номинальной мощности и прочих номинальных условиях (напряжение, частота и т. д.). Поэтому индекс *n*, применяемый иногда для обозначений номинальных величин, в данной книге введен лишь там, где в этом есть особая необходимость.

1. Система индексов

Все величины, относящиеся к первичной обмотке, имеют индекс 1, а относящиеся к вторичной — индекс 2. Поскольку огромное большинство трансформаторов являются понизительными, то индекс 1 относится, вообще говоря, к высоковольтной обмотке, расположенной дальше от сердечника, а индекс 2 — к низковольтной, лежащей ближе к сердечнику.

Из латинских индексов (прямой шрифт) применяются те, которые введены вышеупомянутыми ОСТами. Особо можно отметить следующие индексы:

k — для всех величин, относящихся к короткому замыканию;

0 — для всех величин, относящихся к холостому ходу; применение этого индекса для некоторых размеров (δ_0 , l_0 и пр.) не ведет к смешению обозначений;

r — для величин, относящихся к сопротивлениям; в § 105—107 индекс *r* обозначает „радиальный“;

s — для величин, относящихся к рассеянию.

Кроме латинских, применяются еще русские индексы (курсивный шрифт) для следующих обозначений:

a — активный; в § 105—107 *a* обозначает аксиальный (осевой), что однако не ведет к смешению обозначений;

б — бак;

вз — воздух;

вд — вода;

вл — волнистый бак;

д — добавочный;

зм — змеевик;

и — изоляция; в тепловых расчетах индекс *и* обозначает „излучение“, что однако не ведет к смешению обозначений;

м — медь (обмотки);

мс — масло;

р — реактивный;

с — сталь (сердечника);

тр — трансформатор;

тб — трубки;

ф — фазные величины;

ш — шины;

я — ярмо;

μ — магнитная цепь.

2. Сокращения

В тексте допущены следующие сокращения:

- кв. — квадратный;
- к. п. д. — коэффициент полезного действия;
- [Л.] — ссылка на список литературы в конце книги;
- ок. — около;
- п. — пункт параграфа;
- ПКР⁰/₀ — продолжительность повторно-кратковременной работы в процентах от полного цикла работы;
- Правила и Нормы — Электрические Правила и Нормы, изд. 1933 г.;
- см. — смотри;
- ср. — средний или сравнить;
- м. д. с. — магнитодвижущая сила;
- э. д. с. — электродвижущая сила;
- ≡ — знак пропорциональности (применяется за неимением специального символа; по ГОСТ 573 — это знак тождества);
- ∅ — знак диаметра.

3. Сокращенные названия фирм и заводов

- МТЗ — Московский трансформаторный завод;
- AEG — Германская всеобщая компания электричества;
- ASEA — Шведская фирма ASEA;
- BBC — Браун и Бовери;
- GECo — Американская всеобщая электрическая компания;
- SSW — Сименс-Шуккерт.

4. Обозначения основных размеров в расчетах и чертежах

На основе ГОСТ 2690 выбраны следующие обозначения размеров.

1) Для основных размеров магнитной цепи трансформатора приняты малые буквы латинского алфавита *a, b, c, d, h, l* без индексов (см. рис. 1—6).

2) Осевые размеры и длины обмоток обозначены через *L* и *l* с различными индексами.

3) Радиальные размеры обмоток обозначены через *a* с различными индексами.

4) Зазоры, промежутки, каналы, а иногда и толщины обозначены через *δ* с различными индексами.

5. Единицы, принятые в расчетах и в формулах; размеры на чертежах

К сожалению, в разных местах расчета приходится в формулах пользоваться различными единицами из-за необходимости держаться привычного вида формул; в особенности это относится к единицам длины. Иначе в большинство формул вошли

бы добавочные множители в виде целых (положительных или отрицательных) степеней десяти.

Что касается эскизов и чертежей, то все размеры на них даны в миллиметрах.

6. Буквенные обозначения.

Буквы латинского алфавита

A

- A — ампер
- $A\omega$ — ампервитки
- a — размер окна сердечника
- a_1, a_2 — радиальные размеры обмоток
- a' — размер выступа шайб (рис. 123)
- a_δ — внутренний размер волны бака (рис. 176)
- at — атмосфера
- $a\omega$ — ампервитки на 1 см длины магнитной цепи

B

- B — магнитная индукция в стержнях
- B_α — " " " " ярмах
- b — ширина листов стержня (если все листы одинаковой ширины)
- b_1, b_2 и т. д. — то же, если сечение стержня ступенчатое
- b_δ — наружный размер волны бака (рис. 176)
- b_m — цена 1 kWh потерь в меди
- b_c — " " " " в сердечнике
- b_0 — индуктивная проводимость при холостом ходе
- b_α — ширина листов ярма

C

- C — постоянная интегрирования
- C — " Арнольда
- C — " излучения абсолютно черного тела
- C — емкость, в частности емкость первого элемента обмотки трансформатора относительно последнего
- C — стоимость
- C' — постоянная излучения трансформатора
- C' — емкость высоковольтной обмотки относительно земли
- c — расстояние между осями стержней
- c — теплоемкость
- cm — сантиметр

D

- D — средний диаметр обмоток
- d — диаметр окружности стержня
- $d_{m\delta}$ — " трубок бака
- d'_1, d''_1 — внутренний и наружный диаметры обмотки (1)
- d'_2, d''_2 — то же для обмотки (2)

d_1 — средний диаметр обмотки (1)
 d_2 — то же для обмотки (2)
 dm — дециметр

Е

E — э. д. с. (линейная)
 E_ϕ — э. д. с. (на фазу)
 E_k — полное падение напряжения при коротком замыкании
 E_r — падение напряжения в сопротивлении r
 E_s — индуктивное падение напряжения
 e_k, e_r, e_s — процентные значения предыдущих величин
 e_w — напряжение витка

F

F — механическая сила, усилие
 F_a — сила вдоль оси обмоток
 F_r — „ в радиальном направлении
 F_x — добавочная сила от несимметричности обмоток на $x \%$
 F' — сила на одну полугруппу чередующихся обмоток
 f — частота

G

G — вес
 G_s — гаусс
 g — градиент
 g_u — процентный вес изоляции на проводе
 g_{np} — пробивной градиент
 g_0 — активная проводимость при холостом ходе

H

H — генри
 H — высота
 H_δ — высота бака
 H_k — высота, на протяжении которой струи охлаждающей среды поднимаются вдоль охлаждаемой поверхности, не отрываясь от нее
 $H_{m\delta}$ — высота трубок бака
 Hz — герц
 h — высота (толщина) пакета стержня
 h_δ — высота профиля волн волнистого бака (рис. 176)
 h_u — высота сечения шин
 h — час

I

I — ток линейный
 I_ϕ — ток фазный

I_0 — ток холостого хода
 I_{oa} — активная слагающая тока I_0
 I_{op} — реактивная „ „ I_0

J

J — джоуль

K

K — общий коэффициент теплоотдачи
 $K_{\text{вл}}$ — то же для волнистого бака
 K_1 — общий коэффициент теплоотдачи, постоянный для всех нагрузок трансформатора
 K_2 — коэффициент гармоник
 K_u — „ излучения
 K_{um} — „ импульса
 K_k — „ конвекции
 K' — „ теплоотдачи бака с добавочным обдуванием
 $K_{m\delta}$ — коэффициент теплоотдачи трубчатого бака
 K_F — „ Фильда
 K_R — „ Роговского для продольного потока рассеяния
 K'_R — „ Роговского для поперечного потока рассеяния
 K_s — „ увеличения рассеяния
 k — „ увеличения поверхности гладкого бака от волн или трубок
 k' — „ увеличения теплоотдачи бака от обдувания его воздухом
 k_{12} и k_{21} — коэффициенты трансформации
 k_δ — коэффициент, учитывающий конструкцию бака (§ 73)
 k_δ — „ закрытия обмоток
 k_u — „ изоляции катушек (§ 84)
 k_k — „ увеличения потерь короткого замыкания
 k_m — „ заполнения окна обмоткой (медью)
 k_0 — „ увеличения потерь холостого хода
 k_c — „ заполнения сечения сердечника листами стали
 k_w — „ учитывающий индуктивность шин
 k_π — „ усиления ярма
 k_f — „ формы кривой э. д. с.
 k_{s1}, k_{s2} — коэффициенты в формуле рассеяния чередующихся обмоток (§ 53)
 $k_\emptyset$ — коэффициент заполнения круга геометрическим сечением стержня

L

- L — средняя осевая длина обмоток
 l — длина стержней
 l — литр
 l_1, l_2 — осевые длины обмоток
 l_m — общая длина всех электрических цепей трансформатора (§ 7)
 l_c — общая длина магнитной цепи всего сердечника
 l_0 — изоляционное расстояние от обмоток до ярма
 l_{np} — расстояние пробоя
 $l_{я}$ — длина одного ярма
 l_w — средняя длина витка обеих обмоток
 l_{w1}, l_{w2} — длина витка обмотки (1) и соответственно (2)
 l_{μ} — длина участка магнитной цепи

M

- Mx — максвелл
 m — число фаз
 mm — миллиметр
 m — метр

N

- N — число радиальных опор обмотки
 n — „ ступеней стержня
 n — „ слоев обмотки
 n_a — „ витков в катушке в радиальном направлении (или число слоев)
 n_1 — число витков в обмотке в осевом направлении
 n' — число катушек на стержне

O

- O — охлаждающая поверхность

P

- P — мощность (номинальная везде, кроме § 10, где номинальная мощность обозначена через P_n)
 P_k — потери короткого замыкания
 P_{kd} — „ добавочные в конструктивных частях и в баке
 P_m — „ в меди джоулевы
 P_{md} — „ „ „ добавочные
 P'_m — „ „ „ одной катушки
 P_0 — „ холостого хода
 P_{0d} — потери холостого хода добавочные
 P_{Σ} — „ общие в трансформаторе
 p — число групп чередующихся обмоток
 p' — число катушек в одной группе чередующихся обмоток

p_{δ} — периметр бака
 p_c, p_m — цены за 1 kG стали и соответственно меди

Q

Q — тепловой поток
 Q_u — количество тепла, передаваемое излучением
 Q_k — " " " конвекцией
 Q_{λ} — " " " теплопроводностью
 $Q_{\text{вод}}$ — " воды
 q — удельная тепловая нагрузка поверхности охлаждения

R

R, R' — тепловые сопротивления
 R — средний радиус обмоток
 R_{δ} — радиус закругления бака
 r_1, r_2 — активное сопротивление обмотки (1) и соответственно (2)
 r_k — сопротивление при коротком замыкании:

$$r_k = r_1 + r_2 \cdot k_{12}^2$$

S

S — сименс
 S — активное сечение стержня
 S' — геометрическое " "
 S_m — сечение меди
 $S_{\text{я}}$ — активное сечение ярма
 $S'_{\text{я}}$ — геометрическое " "
 s — секунда
 s — число активных стержней трансформатора

T

T — постоянная нагревания трансформатора
 T_m — " " обмоток
 T_m — время эквивалентных потерь в меди в часах за год
 T_c — " " " в сердечнике в часах за год
 T_n — число часов, соответствующих энергии, отдаваемой трансформатором за год
 t — время
 t_k — продолжительность короткого замыкания

U

U — напряжение
 U_1, U_2 — линейные напряжения обмотки (1) и соответственно (2)

$U_{исп}$ — напряжение испытательное
 $U_{пр}$ — напряжение пробивное
 U_{ϕ} — напряжение фазное
 U_0 — амплитуда перенапряжения, действующего на трансформатор (после первого отражения)
 U_x — перенапряжение в точке x относительно земли
 ΔU — междувитковое перенапряжение
 Δu — процентное изменение напряжения трансформатора

V

V — вольт
 V — объем
 v — скорость
 v — удельные потери в стали

W

W — ватт
 w — число витков обмотки
 $w_{\text{экв}}$ — эквивалентное длине шин

X

x — кратность нагрузки трансформатора
 x — процент выключаемых витков обмотки
 x_1, x_2 — индуктивное сопротивление обмотки (1) и соответственно (2)
 x'_1, x'_2 — то же — приведенные значения
 x_k — индуктивное сопротивление трансформатора при коротком замыкании

Y

Y — соединение обмоток звездой
 y_0 — полная проводимость при холостом ходе

Z

Z — соединение обмоток в зигзаг
 z_k — полное сопротивление трансформатора при коротком замыкании
 $z_{\text{л}}$ — волновое сопротивление линии
 $z_{\text{тр}}$ — трансформатора

Буквы греческого алфавита

α — угол
 α — меньший размер прямоугольного сечения провода
 α — показатель степени (§ 68)
 α — отношение диэлектрических постоянных (§ 63)
 α_s — относительное увеличение индуктивности от несимметричности обмоток
 α_{III}, α_V — процентное значение амплитуд гармоник третьей и пятой по отношению к амплитуде первой гармоники

- β — большой размер прямоугольного сечения провода
- β — показатель степени в формуле потерь (§ 68)
- γ — удельный вес
- Δ — соединение обмоток в треугольник
- Δ — плотность тока
- Δ — символ приращения величины
- δ — зазор, промежуток, в частности зазор в стыках сердечника; иногда δ — толщина
- δ — угол потерь
- δ_1, δ_2 — ширина каналов в обмотках (1) и (2)
- δ_{12} — промежуток между обмотками (1) и (2)
- δ_a — зазор между обмотками соседних фаз
- δ_b — толщина стенок бака
- δ_u — толщина изоляции вообще; в частности изоляции на проводе (считая на обе стороны)
- δ'_u — толщина добавочной изоляции между слоями обмотки
- δ''_u — толщина добавочной изоляции целых катушек
- δ_0 — ширина канала у стержня
- δ_p — величина „разрыва“ в обмотке (§ 63)
- δ_c — толщина листов стали
- $\delta_{\text{ц}}$ — толщина цилиндра
- δ_s — приведенное расстояние между обмотками
- ε — диэлектрическая постоянная
- ζ — вязкость
- ζ — отношение в плане размеров сердечника броневое трансформатора (§ 31)
- η — к. п. д. при полной нагрузке
- η_x — то же, при нагрузке кратности x
- η — коэффициент неоднородности электрического поля
- ϑ — температура вообще
- ϑ_0 — температура окружающей среды
- ϑ_1 — „ горячего тела
- ϑ_2 — „ холодного „
- i — процентный вес изоляции на проводе по отношению к весу меди
- x — отношение первого максимума тока короткого замыкания к амплитуде тока длительного короткого замыкания
- x — коэффициент уменьшения удельной тепловой загрузки поверхности катушек (§ 87)
- x_u — коэффициент утолщения изоляции
- λ — теплопроводность
- μ — магнитная проницаемость
- ν — коэффициент уширения теплового потока, переходящего из стержней в ярма
- ξ — отношение P_0/P_k
- π — обычный математический символ

- ρ — удельное электрическое сопротивление
 ρ_{θ} — удельное тепловое сопротивление
 σ — см. § 53
 σ — механическое напряжение
 τ — перепад температуры и повышение температуры
 τ_I — перепад температуры внутри обмотки или сердечника
 τ_{II} — то же, на поверхности охлаждения их
 τ_{III} — то же, от масла к охладителю
 τ_{IV} — то же, от стенки охладителя к охлаждающей среде
 τ_V — повышение температуры охлаждающей воды
 $\tau', \tau'' \dots$ и т. д. — слагающие внутреннего перепада температуры
 τ_k — повышение температуры при коротком замыкании
 τ_m — наибольшее повышение температуры
 φ — угол сдвига фазы между током и напряжением
 φ_k — угол в треугольнике короткого замыкания
 Φ — главный магнитный поток
 Φ_s — поток рассеяния
 χ — запас электрической прочности
 ψ — отношение G_c/G_m

СОКРАЩЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ЖУРНАЛОВ И ДРУГИХ ИСТОЧНИКОВ

- Бюлл. ВЭИ — Бюллетени Всесоюзного Электротехнического Института.
 ВЭА — Всесоюзная Электротехническая Ассоциация.
 ВЭТЭ — Вестник Экспериментальной и Теоретической Электротехники.
 ОНТИ — Объединенное научно-техническое издательство.
 Эл-во — Электричество.
 AfE — Archiv für Elektrotechnik.
 BASE — Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens.
 BSFE — Bulletin de la Société Française des Electriciens.
 El. Eng-g — Electrical Engineering.
 El. J. — Electric Journal.
 El. Rev. — Electric Review.
 ETZ — Elektrotechnische Zeitschrift.
 E. u M. — Elektrotechnik und Maschinenbau.
 GER — General Electric Review.
 JAIEE — Journal of the American Institute of Electrical Engineers.
 JIEE — Journal of the Institute of Electrical Engineers.
 RGE — Revue Générale d'Electricité.
 Tr. AIEE — Transactions of the American Institute of Electrical Engineers.
 VDI — Verein deutscher Ingenieure.
 Z. f. angew. Mat. u. Mech. — Zeitschrift für die angewandte Mathematik und Mechanik.

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ ¹

[А. Основные пособия по трансформаторам

1. проф. Г. Н. Петров, Трансформаторы, Энергоиздат, 1934.
2. Проф. Л. М. Пиотровский, Трансформаторы, Кубуч, 1934.

¹ В ссылках на литературу страницы указаны по оригиналу (в тех случаях, когда имеется русский перевод).

3. Проф. Ф. И. Холуянов, Трансформаторы однофазного и трехфазного тока, Энергоиздат, 1934.
4. Dr. M. Vidmar, Die Transformatoren, J. Springer, 1925. На русском языке: Д-р. М. Видмар, Трансформаторы, ГНТИ, 1931.
5. Л. М. Шницер, Трансформаторы, ОНТИ, 1936 (элементарное пособие).
6. P. Bunet, Les transformateurs, J.-B. Baillièrre et fils, 1923.
7. E. Reed, The Essentials of Transformer Practice, Chapman und Hall, 1927.
8. Dr. M. Vidmar, Der Transformator im Betrieb, J. Springer, 1927. На русском языке: Д-р. М. Видмар, Трансформатор в эксплуатации, ГНТИ (год не указан).
9. G. Benischke, Die Transformatoren, 1921.
10. C. Feldmann, Elektrotechnische Constructie, Dell III, Waltmann, Delft, 1931.
11. E. Arnold, Die Wechselstromtechnik, B. II, J. Springer, 1910.
- 11a. Новое издание Arnold-la Cour, Wechselstromtechnik, B. II, Die Transformatoren, J. Springer, 1936.
12. СЭТ, Т. V, отд. 35.
13. S. Stigant and Lacey, The Transformer Book, 1926.

В. Книги по расчету трансформаторов

14. А. В. Трамбицкий, Расчет трансформаторов стержневого типа, Энергоиздат, 1931.
15. Проф. Л. М. Пиотровский (см. 2).
16. Н. И. Булгаков, Примеры расчетов трансформаторов, ОНТИ, 1935.
17. Д. В. Васильев, Расчет трансформаторов, изд. Воен.-техн. акад. РККА, 1933.
18. Д-р. М. Видмар (см. 4).
19. Dr. M. Vidmar, Der kupferarme Transformator, J. Springer, 1935.
20. R. Richter, Elektrische Maschinen, B. III, Die Transformatoren, J. Springer, 1932. На русском языке: Р. Рихтер, Электрические машины, т. III, ОНТИ, 1935.
21. M. Liwschitz, Die elektrischen Maschinen, B. III, Teubner, 1934. На русском языке: М. Лившиц, Электрические машины, Т. III, ОНТИ, 1936.
22. R. Wotruba, Die Transformatoren, Oldenburg, 1928.
23. M. Mathieu, Transformateurs de puissance, A. Blanchard, 1927.

С. Описание конструкций трансформаторов

24. А. В. Трамбицкий и В. А. Шуф, Атлас конструкций трансформаторов, Энергоиздат, 1933.
25. А. В. Трамбицкий, Силовые трансформаторы высокого напряжения. В книге А. А. Смурова, Электротехника высокого напряжения, т. II, ч. IV, 1935.
26. Сборник статей „Сборка и испытание высоковольтных трансформаторов“, Энергоиздат, 1933.
27. В. А. Алаев, Производство обмоток трансформаторов, Энергоиздат, 1932.
28. А. В. Корицкий, Конструирование трансформаторов, ОНТИ, 1936.
29. Проф. Г. Н. Петров, Трансформаторы 380 kV, Эл-во, 1936, № 13, стр. 16.
30. Е. А. Войтецкий, Н. Ф. Прохоров и А. В. Сапожников, Сборка магнитопроводов, ОНТИ, 1936.
31. J. Goldstein, Die neuesten Fortschritte im Transformatorenbau, BASE, 1934, № 22, p. 581 (обзор новых конструкций).
32. Marcel Roseaux, Construction des transformateurs statiques, RGE, v. XXXVIII, 1935, №№ 14—17 (обзор новых конструкций).

ЛИТЕРАТУРА, УПОМИНАЕМАЯ В ТЕКСТЕ КНИГИ

Г л а в а III

33. А. В. Трамбицкий, К расчету трансформаторов, Эл-во, 1926, № 6, стр. 271. На немецком языке: A. Trambizki, Zur Berechnung von Transformatoren, E. u. M., 1926, H. 45, S. 845.

34. А. В. Т р а м б и ц к и й, К теории ряда трансформаторов возрастающей мощности, Эл-во, 1927, № 3, стр. 85.
35. А. В. Т р а м б и ц к и й, Способ быстрого нахождения основных размеров мощных трансформаторов при предварительных расчетах, ВЭТЭ, 1930, №№ IV—V, стр. 40. На французском языке: A. T r a m b i z k i, Méthode de détermination rapide des principales dimensions des transformateurs de grande puissance dans un avant-projet (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à Hautes Tensions, 1933).
36. Г. Н. П е т р о в, Определение основных размеров трансформаторов, Труды научно-техн. отд. ВСНХ, 1926.
37. Проф. Г. Н. П е т р о в, Распределение потерь и стоимости в активном материале трансформатора, ВЭТЭ, 1928, № 11, стр. 403.
38. Проф. Г. Н. П е т р о в, Техничко-экономическое обоснование расчета трансформаторов, Энергетик, 1931, № 1, стр. 11.
39. Проф. Г. Н. П е т р о в, Техничко-экономические проблемы высоковольтного трансформаторостроения в СССР, Эл-во, 1933, № 1, стр. 26.
40. Мах. K o r n d ö r f e r, Zur Berechnung von Transformatoren, ETZ, 1933, H. 4, S. 83.
41. B i h a r i u n d S t e i n, Transformatoren-Berechnung mittels Nomogramms, ETZ, 1930, S. 382.
42. B u c h e r, Neue Formeln für die Hauptabmessungen eines Transformators, ETZ, 1929, H. 36, S. 1287.
43. F a y e - H a n s e n, Günstige Verhältnisse zwischen den Stromdichten in den Transformatoren-Wicklungen und über die Grösse der Materialbeanspruchungen, E. u. M., 1929, H. 26, S. 545.
44. R. R i c h t e r, Das Verhältnis der Stromdichten bei Einheitstransformatoren, ETZ, 1933, H. 2, S. 27.
45. R. R i c h t e r, Entwurf von Transformatoren, besonders Einheitstransformatoren, E. u. M., 1932, H. 35, S. 477.
46. Dr. M. V i d m a r, Der wirtschaftliche Aufbau des Transformators, E. u. M., 1933, H. 6, S. 69.
47. Dr. M. V i d m a r, Der wirtschaftliche Aufbau der elektrischen Maschine, 1918. На русском языке: Д-р М. В и д м а р, Экономические законы проектирования электрических машин, Гостехиздат, 1924.
48. Dr. M. V i d m a r, Die Verlustaufteilung der Transformatoren, E. u. M., 1935, H. 4, S. 37.

Г л а в а V

49. O. M a r t i a n d H. W i n o g r a d, Mercury Arc Power Rectifiers. На русском языке: О. М а р т и и Г. В и н о г р а д, Ртутные выпрямители большой мощности, Госжелдориздат, 1933.
50. Инженерно-технические справочники, т. I, Электрификация железных дорог, Трансжелдориздат, 1934.
51. Проф. Г. Н. П е т р о в, Электродинамические усилия в обмотках трансформаторов для ртутных выпрямителей, Бюлл. ВЭИ, 1935, № 5, стр. 41.
52. Е. Г. М а р к в а р т и В. Г у с а к о в, О токах короткого замыкания при обратных зажиганиях в трансформаторах для ртутных выпрямителей, Бюлл. ВЭИ, 1935, № 5, стр. 47.
53. Ю. К р о н г а у з, Трансформаторы для печей МИГЕ, „Догоним и перегоним“, 1934, № 6—7, стр. 57.
54. S. S. C o o k, Transformers for Electric Furnaces, El. J., Sept. 1933, p. 359.
55. N. R. S t a n s e l, Industrial Electric Heating, GER, May 1937, p. 246.
56. А. М. Б а м д а с и Б. В. Б е л я е в, Система Скотта, Эл-во, 1935, № 19, стр. 42.
57. H. P. Y o u n g, Scott-Connected Transformers, El. Rev., 1935, p. 446.
58. H. d e P i s t o y é, Le couplage Scott et les montages similaires, RGE, T. XXV, № 1, p. 1.
59. J. G o l d s t e i n, Die Messwandler. На русском языке: И. Г о л ь д - ш т е й н, Измерительные трансформаторы, Гостехиздат, 1930.
60. A. K e l l e r, Präzisionsstromwandler, ETZ, 1927, H. 49, S. 1795.
61. C. T. M e l l i n g, Design of Current Transformers, JIEE, Febr. 1927, p. 283.
62. W. R e i c h e, Trockenstromwandler, Elektrizitäts-Wirtschaft, 1932, № 4.

63. J. Goldstein, Die neueste Entwicklung in Stromwandlerbau, ETZ, 1932, H. 16—21.
64. E. Billig, Vorausberechnung der Fehler von normalen Stromwandlern, ETZ, 1933, H. 16, S. 374.
65. Stubbings, The Maximum VA Output of Series Transformers, World Power, March 1926.
66. S. Leonard, Übersetzungsfehler von Messtransformatoren, E. u. M., 1936, H. 23, S. 268.
67. J. H. Buchanan, Design, Construction and Testing of Voltage Transformers, JIEE, March 1936, p. 292.
68. The English Electric Co, Transformer Tap Changing on Load, The Engineer, 1929, v. 148, pp. 30, 56, 84, 110, 139, 176.
69. М. А. Гаврилов, Изменение под нагрузкой коэффициента трансформации трансформаторов, Бюллетень инж. коллектива МОГЭС, № 7, 1929, янв.—февр.
70. W. Grob, Spannungs Regler von Transformatoren unter Last, BASE, Jan. 1931, p. 2.
71. H. Diggle, On load Tap Changing Gear for Small Transformers, Metrovick Gazette, Jan. 1935.
72. K. K. Palueff, Effect of Transient Voltages on Power Transformer Design, Tr. AIEE, July 1929.
73. W. A. Mc-Morris and J. Hagenguth, Non Resonating Transformers, GER, Oct. 1930.
74. Акад. А. А. Чернышев, Защита обмоток трансформатора, Эл-во, 1931, № 1.
75. Г. Г. Швец, О расчете реактивности каскада испытательных трансформаторов, Вестник электропромышленности, 1934, № 1.
76. Н. К. Кюнер и А. В. Панов, Перенапряжения в испытательных трансформаторах, Бюлл. ВЭИ, 1935, № 11.
77. Noris and Taylor, High Voltage Testing Equipment, JIEE, June 1931, p. 673.
78. П. Пааше, Новый испытательный трансформатор высокого напряжения, Эл-во, 1929, № 23/24, стр. 630.
79. Draeger, Das Rosenthal-Hochvolthaus für 2000 kV gegen Erde, ETZ, 1930, H. 26, S. 933.

Г л а в а VI

80. J. Goldstein, Zur Wahl der Induktion im Transformatorenbau, BASE, 1935, № 12, p. 305.
81. G. Stein, Pertes supplémentaires dans le transformateur, Congrès international d'électricité, Paris, 1932, Rapport № 26.
82. Dr. M. Vidmar, Das Jochgesetz bei Transformatoren, E. u. M., 1933, H. 51, S. 662.
83. Dr. M. Vidmar, Transformatoren mit verstärkten Jochen, BASE, 1933, № 12, S. 257.
84. Н. П. Ермолин, Пятистержневой трансформатор, Эл-во, 1935, № 1, стр. 27.
85. R. Freiburger, Theorie des Fünfschenkeltransformators, E. u. M., 1935, H. 7, S. 232.

Г л а в а VII

86. R. H. Chadwick, Transformer Windings with Fractional Turns, GER, 1927, № 7, p. 342.
87. B. Hague, Electromagnetic Problems in Electrical Engineering, 1929, Oxford University Press. На русском языке: Б. Хэг, Электромагнитные расчеты, ОНТИ, 1934.
88. Gisbert Kapp, Ein Beitrag zur Vorausberechnung der Streuung in Transformatoren, ETZ, 1898, H. 15, S. 244.
89. W. Rogowski, Über das Streufeld und den Streuinduktionskoeffizienten eines Transformators mit Scheibenwicklung und geteilten Endspulen, Mitteilungen über Forschungsarbeiten VDI, 1909, H. 71, S. 3 (см. примечание к § 53).

90. W. Rogowski, Über die Streuung in Transformatoren, ETZ, 1910, H. 41, S. 1033.
91. A. R. Stevenson, Fundamental Theory of Flux Plotting, GER, Nov. 1926, p. 797.
92. Bödefeld, Streuungsrechnung und Feldbilder in der Elektrotechnik, ETZ, 1931, S. 763.
93. G. Stein, Potentialtheoretische Untersuchungen über Magnetfelder in Transformatoren und über ihre Streuinduktivität, Z. f. angew. Mat. u. Mech., 1929, S. 23.
94. H. Hemmeter, Die Felder des Transformators, AfE, B. XVI, S. 301.
95. M. P. Bunet, Dispersion des transformateurs, BSFE, Sept. 1934, p. 847.
96. M. Galmiche, Note sur la réactance de fuites des transformateurs, BSFE, Sept. 1934, p. 885.
97. E. Roth, Etude analytique du champ de fuites des transformateurs, RGE, T. XXIII, p. 773.
98. Е. Г. Марквардт, Об электромагнитном рассеянии, Эл-во, 1935, № 9, стр. 44.
99. Е. Г. Марквардт, Индуктивности рассеяния обмоток трансформатора, Эл-во, 1936, № 23, стр. 26.
100. Проф. Г. Н. Петров, Обобщенный метод расчета рассеяния трансформаторов, ВЭТЭ, 1932, № 5—6; Е. и. М., 1933, № 25, S. 345.
101. Проф. Г. Н. Петров, Расчет рассеяния обмоток при произвольном их расположении на сердечнике, Бюлл. ВЭИ, 1934, № 5, стр. 1.
102. Проф. Г. Н. Петров, К расчету рассеяния трансформатора, Эл-во, 1935, № 15, стр. 3.
103. R. Küchler, Beitrag zur Berechnung der Streuspannung von Transformatorenwicklungen, ETZ, 1924, S. 273.
104. M. Papin, Etude sur le fonctionnement des transformateurs en court circuit, RGE, 1925, T. XVII, № 20, p. 756.
105. H. Pistoüyé, A propos de transformateurs à hauteur de bobinages inégales, RGE, 1925, T. XVIII, pp. 1013 et 1057.
106. F. Kade, Die Kurzschlussspannung von Drehstromtransformatoren in Zickzagshaltung, ETZ, 1918, S. 513.

Глава VIII

107. Л. Сиротинский, Перенапряжения и защита от перенапряжений в электрических установках, Энергоиздат, 1933.
108. И. Стекольников, Перенапряжения и борьба с ними, ч. I и II Энергоиздат, 1932—1933.
109. В. А. Карасев, Перенапряжения в трансформаторах с глухо заземленной нейтралью, Энергоиздат, 1934.
110. Проф. Г. А. Гринберг, М. Н. Конторович и Н. Н. Лебедев, Теория переходных процессов в трансформаторах, ВЭА, 1934 (доклад).
111. С. А. Назаров и В. А. Карасев, Влияние „среза“ волны на градиенты напряжения в обмотке трансформатора, ВЭА, 1934 (доклад).
112. Многочисленную иностранную литературу по перенапряжению в трансформаторах см. [Л. 1, стр. 442].
113. R. Willheim, Die Gewitterfestigkeit des Drehstromtransformators, Е. и. М., 1932, H. 2, S. 28.
114. Проф. А. А. Смуров, Электротехника высокого напряжения, т. II, ч. 2, 1935.
115. Dr. A. Gemant, Elektrophysik der Isolierstoffe, J. Springer, 1930.
116. М. М. Михайлов, Электротехнические материалы, Кубуч, 1933.
117. Физика диэлектриков; под редакцией проф. А. Ф. Вальтера, ОНТИ, 1932.
118. Проф. Г. Л. Эпштейн, Производство высоковольтного оборудования в США, Эл-во, 1936, № 17, стр. 45.
119. Bölsterli, Nicht feuergefährliche Flüssigkeiten, BASE, 1935, p. 185.
120. Проф. А. А. Смуров, Электротехника высокого напряжения, т. I, ОНТИ, 1931.
121. A. Roth, Hochspannungstechnik, J. Springer, 1927.

122. R e t z o w, Die Eigenschaften elektrotechnischer Isoliermaterialien in graphischer Darstellung, J. Springer, 1927.
123. R o g o w s k i, Durchschlag fester Isolatoren, AfE, 1924, B. XVIII, H. 2.
124. R o g o w s k i, Molekulare und technische Durchschlagfeldstärke fester elektrischer Isolatoren, AfE, 1927, B. XVIII, H. 2.
125. H o o v e r, Mechanisme of Rupture of Dielectrics, JAIEE, Sept. 1926, p. 824.
126. H. C u r t i s, The Electrical Resistivity of Insulating Materials, JAIEE, Oct. 1927, p. 1095.
127. P r o f. A. S m u r o w, Die physikalische Natur der elektrischen Vorgänge in homogenen Isolatoren, AfE, 1929, B. XXII, H. 1, S. 31.
128. F. W. P e e k, Dielectric Phenomena im High-Voltage Engineering, Mc. Graw-Hill Book Co, 1929. На русском языке: Ф. П и к, Диэлектрические явления в технике высоких напряжений, ОНТИ, 1934.
129. D r A. G e m a n t, Elektrophysik der Isolierstoffe, J. Springer, 1930.
130. В. А. К а р а с е в, О конструкции трансформаторов 160÷220 kV с точки зрения грозоупорности, Бюлл. ВЭИ, 1934, № 3, стр. 14.
131. А. В. П а н о в, Изоляция высоковольтных трансформаторов, ВЭА, 1934, № 19.
132. H. G. N o l e n, Windungsisolation von Grosstransformatoren für sehr hohe Spannungen, E. u. M., 1936, № 6, S. 61.
133. С. А. Н а з а р о в, О требованиях к изоляции трансформатора с изолированной нейтралью, Бюлл. ВЭИ, 1935, № 10, стр. 9.
134. W. K e h s e, Die Isolation von Grosstransformatoren hoher Spannung, ETZ, 1931, S. 1417.
135. И. С. С т е к о л ь н и к о в, Координация изоляции, ВЭА, 1934, № 9.
136. В. А. К а р а с е в, Трансформатор с частичной емкостной компенсацией, ВЭА, 1934, № 41.
137. В. А. К а р а с е в, Градация изоляции резонирующего трансформатора, ВЭА, 1934, № 51.
138. L e w i s, Relation between Transmission Line Insulation and Transformer Insulation, Tr. AIEE, Oct. 1928.
139. V o g e l, Factors Influencing the Insulation Coordination of Transformers, Tr. AIEE, June 1933.
140. M o n t s i n g e r, L l o y d, C l e m, Coordination of Insulation, Tr. AIEE, June 1933.
141. П. П. С т е н д е р, К теории трансформатора Палуева, Журнал технической физики, 1933, т. III, № 2—3.
142. W. A. M c - M o r i s and J. H a g e n g u t h, Non Resonating Transformers, GER, Oct. 1930.
143. K. K. P a l u e f f, Effect of Transient Voltage on Power Transformer Design, Tr. AIEE, July 1930; May, July 1929.
144. D r e y f u s, Über die Berechnung der Durchschlagspannung zwischen kantigen Konstruktionsteilen unter Oel, AfE, 1924, B. 13, H. 2, S. 123.
145. J. M u r r e y W e e d, Prevention of Transient Voltage in Windings, Tr. AIEE, v. 41, 1922, p. 149.

Г л а в а IX

146. П р о ф. Л. М. П и о т р о в с к и й, Исследование режима холостого хода трансформаторов, Эл-во, 1935, № 1, стр. 17.
147. D r. M. V i d m a r, Zusätzliche Magnetisierungsströme des dreiphasigen Transformators, E. u. M., 1931, H. 4, S. 61.
148. P. K e m p and H. P. Y o u n g, Polyphase Transformers Magnetising Current Wave-Forms, JIEE, Sept. 1925, v. 63, p. 877.
149. K. S e d l m a y r, Der Leerlauf des Transformators bei allgemeiner Sternschaltung, E. u. M., 1933, H. 48, S. 625.
150. Д. В. В а с и л ь е в, О потерях в железе для трансформаторов и других электромагнитных механизмов, Эл-во, 1935, № 15, стр. 26.
151. П р о ф. Л. М. П и о т р о в с к и й, потери в стали машин и трансформаторов, Эл-во, 1936, № 4, стр. 9.
152. G. S t e i n, Pertes supplémentaires dans le transformateur, Congrès International d'Electricité, Paris, 1932.

153. E. Stein und E. Uhlmann, Feldverteilung und drehende Magnetisierung in Drehstromtransformatoren, W. Petersen, 1930, Forschung und Technik.
154. Karl Thien, Die Eisenkurzschlussicherheit des Kernes und die Kurzschlussicherheit der Wicklung neuer Transformatoren, E. u. M., 1925, H. 10.
155. F. Heiles, Die zusätzlichen Verluste in Transformatoren, ETZ, 1932, H. 37.

Г л а в а X

156. Тен Бош, Теплопередача, Нефтяное из-во, 1930.
157. W. Nusselt, Mitteilungen über Forschungsarbeiten, VDI, H. 63/64.
158. Ezer Griffiths & Davis, Special Report № 9, Department of Scientific and Industrial Research, London.
159. W. Nusselt und Jurgens, Das Temperaturfeld über einer lotrecht stehenden geheizten Platte, VDI, 1928, S. 597.
160. Z. Henky, Kälteindustrie, S. 79.
161. V. Montsinger and W. Cooney, Temperatur Rise of Stationary Electrical Apparatus as Influenced by Radiation, Convection and Altitude, Tr. AIEE, 1924, p. 814.
162. Н. Е. Лысов и Н. П. Маркин, Отдача тепла с нагретой поверхности в трансформаторном масле и сжатых газах, Вестник электропромышленности, 1935, № 1—2.
163. В. Жузе, Теплопроводность нефтепродуктов, Азербайджанское народное хозяйство, № 8—9, 1929.
164. R. Küchler, Vorausbestimmung der stationären Erwärmung des selbstkühlenden Oeltransformators, ETZ, 1923, H. 3, S. 54.
165. W. Kehse, Der praktische Transformatorenbau, Verlag Enke, 1934.
166. Г. Н. Петров, О нагревании катушек, обтекаемых током, ВЭТЭ, 1931, № 2.
167. F. Steckler, Kühlkanäle von Transformatoren mit Scheibenwicklung, E. u. M., 1928, H. 13, S. 285.
168. F. Steckler, Die Oberflächenbeanspruchung des Spulenkupfers von Oeltransformatoren mit Scheibenwicklung durch die Wärme, E. u. M., 1929, H. 19, S. 395.
169. K. K. Palueff, Power Transformers with Concentric Windings, El. Eng-g, June 1936, p. 649.
170. A. Finzi, Zur Frage der Überlastbarkeit oelgekühlter Transformatoren, E. u. M., 1932, H. 46, S. 629.
171. V. M. Montsinger and W. M. Dann, Overloading of Power Transformers, El. Eng-g, Oct. 1934, p. 1353.
172. V. M. Montsinger, Loading Transformers by Temperature, Tr. AIEE, v. 49, 1930, p. 776.
173. W. M. Dann, Operating Transformers by Temperature, JAIEE, v. 49, 1930, p. 793.

Г л а в а XI

174. Wolff, Die thermischen Eigenschaften der Transformatoren-Röhrenkästen, ETZ, 1932, H. 38.

Г л а в а XII

175. Проф. Г. Н. Петров, Обобщенный метод расчета механических усилий, действующих в обмотках трансформатора, Бюлл. ВЭИ, 1934, № 8.
176. A. Korb, Stromkräfte bei Transformatoren mit Röhrenspulen, E. u. M., 1932, H. 36—37.
177. В. С. Давыдов, К вопросу о механических усилиях в трансформаторе при коротком замыкании, Эл-во, 1929, № 7—8, стр. 163.
178. J. Biermanns, Überströme in Hochspannungsanlagen, J. Springer, 1926. На русском языке: И. Бирманс, Сверхтоки в установках высокого напряжения, Энергоиздат, 1932.
179. Clem, Mechanical Forces in Transformers, JAIEE, 1927, v. 46, p. 814.
180. Проф. Г. Н. Петров, Трехобмоточные трансформаторы, Сборник статей по энергетике, 1932, вып. электротехнический, № 2, стр. 1.
181. Проф. В. С. Меськин, Ферромагнитные сплавы, ОНТИ, 1937.

Основные данные силовых трехфазных трансформаторов с естественным

Мощность P кВА	Высшее напря- жение U_1 кВ	e_k %	Сердечник										i_0 %
			размеры в мм			сечения в см ²		вес в кГ			индукция B Гс	потери P_c Вт	
			d	l	c	S	$S_{я}$	стержни	ярма	общий			
5	6	5,5	90	150	200	47,6	49,4	16,1	34,6	50,7	9800	60	10
5	20	5,5	90	285	235	47,6	49,4	30,6	39,8	70,4		90	10
10	6	5,5	90	180	200	47,6	49,4	19,3	34,6	53,9	12000	105	10
10	20	5,5	90	340	235	47,6	49,4	36,5	39,8	76,3		140	10
20	6	5,5	120	160	240	86	88	31,0	75,5	106,5	11300	180	10
20	20	5,5	120	305	260	86	88	59,2	80,9	140		220	10
20	35	6,5	120	395	300	86	88	76,5	91,5	168		270	10
50	6	5,5	130	225	260	100,5	106	48,5	98,5	147	13350	355	8,5
50	20	5,5	130	370	265	100,5	106	83,6	100	183,6		440	9
50	35	6,5	130	405	310	100,5	106	91,5	114,2	205,7		540	9,5
100	6	5,5	160	225	290	154,5	160	78	168	246	13250	600	7
100	20	5,5	160	370	310	154,5	160	128,5	177,5	306		730	7,5
100	35	6,5	160	405	350	154,5	160	140,5	196,5	337		900	8
180	6	5,5	190	275	335	221	222	142	271	413	13100	1000	7
180	20	5,5	190	350	345	221	222	174,5	278	452,5		1200	7,5
180	35	6,5	190	545	390	221	222	271	307	578		1500	8
320	6	5,5	200	410	315	243	250	223,8	315,2	539	14500	1600	7
320	20	5,5	200	480	360	243	250	262	327	589		1900	7,5
320	35	6,5	200	625	405	243	250	342,5	360,5	703	14300	2300	8
560	6	5,5	230	510	380	324	327	393,5	437,5	851	13950	2500	7
560	20	5,5	230	540	410	324	327	393,5	486,5	880		2800	7,5
560	35	6,5	230	715	440	324	327	521	517	1038		3350	8
1000	6	5,5	260	750	470	395	430	711	740	1450	14500	4700	4,5
1000	20	5,5	260	800	470	395	430	711	740	1450		4700	4,5
1000	35	6,5	260	950	500	395	430	845	780	1625	14250	5100	4,5
1800	6	5,5	320	750	550	605	665	1090	1350	2440	14350	8850	4,5
1800	20	5,5	320	800	550	605	665	1090	1350	2440		8850	4
1800	35	6,5	320	850	570	605	665	1160	1400	2560	14500	9300	4,5
3200	6	5,5	350	900	580	745	830	1510	1790	3300	14400	12000	3,5
3200	20	5,5	350	900	580	745	830	1510	1790	3300		12000	3,5
3200	35	7,0	350	1000	615	745	830	1675	1880	3555	14400	12500	4
5600	6	5,5	430	1000	675	1075	1190	2420	3020	5440	14350	19500	3,5
5600	20	5,5	430	1000	675	1075	1190	2420	3020	5440		19500	3,5
5600	35	7,5	430	1100	700	1075	1190	2660	3115	5775	14350	21000	4

¹ Первый столбец относится к обмотке высшего напряжения, второй — к обмот

² Первый столбец относится к трансформаторам для внутренней установки, вто

ПРИЛОЖЕНИЯ

ца I

масляным охлаждением для частоты 50 Hz в исполнении МТЗ (по ОСТ 2524)

Обмотки										Вес в kG			Размеры в mm				
e_w V Виток	Δ_1 A mm ²	Δ_2 A mm ²	вес меди kG	P_m потери W	уд. тепло- вая загруз- ка		δ_{12} mm	l_0 ¹ mm		выемная часть	трансформа- тор без масла	масло	в плане		высота бака без катков	высота ² полная	
					q_1	q_2											
1,04	2,25	2,13	20,0	165	500	400 и	8,5	15	7,5	82	165	115	895	770	770	820	820
				185		600	23,0	35	30	170	245	205	1300	495	875	1245	1245
1,27	2,45	2,30	26,2	335	800	700 и	8,5	15	7,5	93	177	113	895	770	770	820	820
				335		900	22	35	30	190	265	200	1300	495	875	1245	1245
2,16	2,71	3,19	31,2	600	600	1150	8,5	15	7,5	160	248	102	965	770	800	850	850
			36,1	600			22	35	30	265	350	240	1350	555	895	1265	1265
				600			30	60	50	405	550	400	1845	555	1185	1705	1725
2,99	3,36	3,09	54,2	1325	950	800	8,5	15	7,5	235	385	205	1080	850	840	940	940
				1325			22	35	30	335	450	290	1350	625	1060	1430	1430
				1325			30	60	50	460	605	390	1845	555	1185	1705	1725
4,55	3,57	4,13	74,0	2400	1300	1300	8,5	15	7,5	355	580	240	1400	850	970	1145	1145
				2400			22,5	35	30	490	655	345	1430	725	1110	1540	1540
				2400			29,5	60	50	635	890	520	1870	785	1240	1980	1980
6,45	3,70	4,41	103,7	4000	1150	1500	14	20	20	745	1125	385	1560	860	1050	1660	1660
				4100			17	35	30	765	1120	520	1820	900	1060	1720	1720
				4100	1000	600	40,5	60	50	980	1415	900	2160	890	1415	2350	2350
7,80	4,08	3,4	170	6070	1200	1500	17	20	20	830	1320	600	1670	900	1340	2000	2000
				6200			19,5	35	30	970	1445	705	1850	900	1445	2155	2155
7,68			178	6200	1300	1500	31	60	50	1190	1670	1040	2160	890	1595	2530	2530
10,05	3,25	4,65	259	8960	1300	1550	20,5	20	20	1240	2180	1320	2540	1180	1560	2460	2460
				9400			20,5	35	30	1240	2180	1320	2540	1180	1560	2460	2460
				9400	1400	1200	36,5	60	50	1620	2600	1400	2540	1180	1670	2570	2570
12,75	3,67	2,96	423	15000	1000	1400	20	30	30	2600	4150	2250	2710	1340	2020	3180	3180
				15000			22,5	50	50	2600	4150	2250	2710	1340	2020	3180	3180
12,5	4,18	3,19	485	15000	1300	1000	33,5	75	75	2800	4350	2250	2710	1340	2020	3180	3180
19,3	3,95	3,63	606,5	23000	1500	1550	22	30	30	3600	6200	3600	3180	2000	2380	3700	3700
				23000			27,5	50	50	3600	6200	3600	3180	2000	2380	3700	3700
19,45	3,76	4,24	606	23000	1400	1500	32,5	75	75	3800	6420	3580	3180	2000	2380	3700	3700
23,9	3,40	3,84	970	36500	1450	1550	19	50	50	5120	8260	4990	3370	1950	3040	4360	4360
				36500			21	50	50	5120	8260	4990	3370	1950	3040	4360	4360
23,9	3,69	3,73	1034	36500	1500	1500	29,5	75	75	5470	8630	4920	3370	1950	3040	4360	4360
34,3	4,66	3,80	1214	58300	1450	1550	20,5	50	50	8150	12580	6220	3410	3050	3050	4420	4420
				58300			24	50	50	8150	12580	6220	3410	3050	3050	4420	4420
34,3	4,10	4,43	1281	58300	1550	1550	36	75	75	8600	13050	6150	3410	3050	3050	4420	4420

ке низшего напряжения.
рой — для наружной установки.

Т а б л и
Основные данные мощных трансформаторов для

Мощность P кВА		
Высшее напряжение U_1 кV		
e_k %	Сердечник	
	размеры в mm	
	d	l
	c	
	сечение стержня S см ²	
	вес стали G_c кг	
	индукция B Gs	
	потери P_c kW	
	ток холостого хода i_0 %	
	Обмотка	
	плотности тока в A/mm ²	
	Δ_1	Δ_2
	вес меди G_m кг	
	потери P_m kW	

Т р а н с ф о р м а т о

5000	35	7,6	430	1320	750	1120	4280	14450	13,85	3,5	3,73	3,83	1263	45,0
6667	35	7,5	470	1440	800	1323	5430	14190	17,3	3	3,67	3,54	1605	53,4
10500	35	7,7	509	1680	850	1580	7260	14150	23,3	2,8	3,71	3,20	2383	77,0
13500	35	8,2	548	1800	910	1780	8810	14150	27,4	2,5	3,21	3,54	3024	91,5
20000	35	7,8	627	1920	1020	2320	12550	14160	39,5	2,2	3,21	3,72	3789	120,0
5000	110	10,5	—	—	—	—	—	—	18,0	—	—	—	—	47,0
6667	110	10,2	509	1440	980	1580	7020	14250	22,8	3,5	4,27	3,89	1360	54,8
10500	110	10,2	548	1800	1000	1780	9060	14230	28,5	3	3,9	3,93	2082	81,5
13500	110	10,4	588	1920	1050	2100	10820	14150	33,9	3	3,71	3,75	2651	99,1
20000	110	10,1	666	2040	1150	2590	15120	14050	47,0	2,5	3,53	4,11	3372	129,5

Т р а н с ф о р м а т о

7500	35	7,5	430	1320	750	1120	6810	14500	24,1	3,5	3,72	3,64	1921	65,1
10000	35	7,5	470	1440	800	1323	8580	14190	28,8	3	3,67	3,44	2430	78,1
15000	35	7,7	509	1560	850	1580	11026	14360	38,3	3	3,53	3,28	3402	106,1
20000	35	7,7	548	1800	910	1840	14320	14050	48,4	2,5	3,17	3,49	4430	130,2
31500	35	7,8	627	1920	1020	2385	20400	14150	71,8	2	3,34	3,29	5991	177,6
3200	110	10,5	—	—	—	—	—	—	16,6	—	—	—	—	39,5
5600	110	10,5	—	—	—	—	—	—	25,5	—	—	—	—	62,5
7500	110	10,4	470	1440	1000	1323	9440	14300	32,4	4	4,53	3,28	1774	69,3
10000	110	11,0	509	1440	1040	1580	11560	14050	38,5	3,5	3,67	3,77	2350	79,0
15000	110	10,1	548	1680	1060	1840	14690	14280	51,5	3,5	3,72	3,7	3072	110,4
20000	110	10,7	588	1800	1100	2080	17535	14100	60,8	3	3,67	3,96	3785	143,8
31500	110	10,2	666	2040	1200	2670	25080	13960	87,4	2,5	3,72	3,98	5125	202,6

П р и м е ч а н и е. Габаритные размеры всего трансформатора зависят, главным об

ца II
частоты 50 Hz в исполнении МТЗ (по ОСТ 2524)

Охлаждение					Вес в t			Размеры в mm			
потери общие P_{Σ}	система охлаждения	поверхность охлаждения в m^2		максимальное повышение температуры масла $\tau_{mc} = ^\circ C$	выемная часть	трансформатор без масла	масло	внутренние размеры бака		габаритные размеры трансформатора	
		бака	радиаторов					в плане (овал)	высота	в плане	высота с изоляторами и пр.

ры однофазные

58,85	Ест. масл.	24,5	155	52,0	6,8	11,0	4,7	1650×1100	3000	3800×3250	4100
70,7	"	30,0	160	56,0	8,5	12,6	5,7	1850×1200	3250	3800×3350	4700
100,3	Добав. обдув.	30,8	191	51,5	11,8	17,6	5,2	1850×1200	3250	3800×3700	5100
118,9	"	36,6	230	50,0	14,4	21,6	6,7	2050×1300	3500	—	—
159,5	"	45,7	276	53,5	19,5	28,0	8,7	2250×1400	4000	—	—
По ОСТ											
65	Ест. масл.	—	—	2524	9,0	15,9	11,9	—	—	3200×4040	5700
77,5	"	45,0	200	47,5	10,7	18,3	12,5	2500×1800	3500	4300×4100	5660
110,0	Добав. обдув.	55,0	153	53,5	14,5	22,9	13,0	2500×1800	4000	3340×4160	6185
133,0	"	59,0	191	52,5	17,0	27,0	16,0	2700×1900	4250	4600×4260	6470
176,5	"	68,0	265	52,5	23,5	35,0	18,8	2900×2000	4500	4800×4500	6700

ры трехфазные

89,2	Ест. масл.	35,4	222	51,0	10,7	16,4	7,2	2400×1100	3250	4550×3250	4950
106,9	"	39,8	246	57,5	13,5	19,8	9,0	2700×1200	3250	4400×3500	4960
144,4	Добав. обдув.	41	268	52,5	17,5	25,4	7,9	2700×1200	3250	4850×3500	5060
178,6	"	49,5	306	56,0	23,0	32,0	9,9	3000×1300	3500	5150×3800	5360
249,4	"	61,7	415	55,0	32,0	43,2	13,0	3300×1400	4000	5550×4300	6100
56,1	Ест. масл.	—	—	По ОСТ 2524	8	15,4	12,3	—	—	4110×3455	5435
88,0	"	—	—		12,2	22,8	15,8	—	—	3870×4335	5680
101,7	"	60	238	50,0	14	24	18,6	3600×1800	3500	5440×4060	5635
117,5	"	60	282	52,0	17,5	28,6	18,6	3600×1800	3500	4960×4200	5680
161,9	Добав. обдув.	71	191	59,0	22,4	34,2	19,3	3600×1800	4000	4930×4240	6200
204,6	"	76,5	306	52,5	27,0	40,5	22,5	3900×1900	4000	6150×4465	6445
290,0	"	92	477	51,0	38,0	54,5	29,0	4200×2000	4500	6400×4900	6900

разом, от числа и расположения радиаторов.

Т а б л и
Физические постоянные некото

№ по пор.	Материал	Удель- ный вес γ kG/dm ³	Удельное сопроти- вление $\rho \frac{\Omega}{\text{m/mm}^2}$	Среднее зна- чение темпе- ратурного коэффициента α
1	Сталь листовая электротехническая, марки ЕС1А	7,8	0,22	0,002
2	Сталь листовая электротехническая, марки ЕС4А	7,6	0,58	0,001
3	Пакет листовой стали ЕС4А с бумажной изоляцией в поперечном направлении в сухом виде	—	—	—
4	То же, в масле	—	—	—
5	Сталь листовая марки С2	} 7,85	0,12÷0,14	0,0045
6	„ круглая „ С3			0,0048
7	Медь обмоточная отожженная	8,89	0,0175	0,00393
8	Латунь тянутая	8,5÷8,7	0,07÷0,08	0,0017
9	Алюминий мягкий	2,73	0,0295	0,0037
10	Свинец	11,3	0,21	0,0037
11	Хромоникель	8,15	1,11	0,0001
12	Константан	8,96	0,5	0,00005
13	Никель	8,9	0,12	0,0037
14	Платина	21,4	0,0944	0,0038
15	Серебро	10,5	0,0165	0,0036
16	Цинк	7,1	0,06	0,0039
17	Олово	7,3	0,12	0,0045
18	Чугун серый	7,25	0,52÷0,84	0,0010

Т а б л и
Физические постоянные некото

№ по пор.	Материал	Удельный вес γ kG/dm ³	Диэлектри- ческая постоянная ϵ	Удельное опротивл. ρ $\Omega \cdot \text{cm}$ при +20°C
1	Лакоткань	1,1 ÷ 1,35	3,5÷5,0	10 ¹²
2	Пресшпан сухой	0,9 ÷ 1,3 *	2,5÷4 0	10 ⁹ ÷ 10 ¹³
3	„ пропитанный маслом	—	5,0	10 ¹² ÷10 ¹³
4	Гэтинакс	1,3 ÷ 1,4	6,5	10 ¹¹
5	Фибра	1,2 ÷ 1,4	3,0÷5,0	10 ¹⁰
6	Трансформаторное масло	0,85÷0,89	2,3÷2,5	10 ¹² ÷10 ¹³
7	Фарфор	2,4	4÷6	10 ¹³ ÷10 ¹⁴
8	Воздух при + 20° С и 760 mm	0,00121	1,0	—
9	Бумага кабельная	0,8	2,5	10 ¹⁰
10	Слюда	2,8	5÷7	10 ¹³ ÷10 ¹⁵
11	Миканит прокладочный	2,2	—	10 ¹² ÷10 ¹³
12	Береза в воздушнс-сухом состоянии	0,64	—	10 ¹²
13	Бук „ „ „ „	0,73	—	10 ¹¹
14	Резина листовая	1,3÷1,8	3,5	10 ¹³ ÷10 ¹⁴

ца III
рых материалов (проводники)

Теплопро- водность $\lambda \frac{W}{cm \cdot ^\circ C}$	Теплоем- кость при 20° C $c \frac{Ws}{kG \cdot ^\circ C}$	Временное сопротивле- ние на разрыв кG/mm ²	Допускаемое напряжение на разрыв при спокойной на- грузке кG/cm ²	Линейный те- пловый коэф- фициент расши- рения (от 0 до 100° C)	Темпера- тура пла- вления ° C	Примечание
0,5 0,2÷0,3	} 480÷490	31,5 56	— —	— —	} 1350÷1500	p=0,099+0,12 Si [Л. 181, стр. 566] Si—содержание кремния в про- центах
Ок. 0,005 Ок. 0,01 0,3÷0,5		— — 34÷42	— — 1000÷1200	— — 1,080×10 ⁻⁵		
0,5	} 480÷490	38÷45	1100÷1400	1,080×10 ⁻⁵	}	60 Cu+40 Zn
3,8		Не менее 21	600	1,643×10 ⁻⁵		
0,6÷1,0	390	30÷40	600	1,933×10 ⁻⁵	1084	
2,02	370	7,5÷10	300	2,180×10 ⁻⁵	900	
0,35	881	—	—	2,848×10 ⁻⁵	658	
0,15	127	80	—	1,700×10 ⁻⁵	326	
2,3	447	—	—	1,870×10 ⁻⁵	1350	
0,56	415	—	—	1,279×10 ⁻⁵	1020	
0,7	460	—	—	0,884×10 ⁻⁵	1450	
4,17	136	—	—	1,909×10 ⁻⁵	1764	
1,1	230	19	—	3,100×10 ⁻⁵	960	
0,63	389	3,5÷4,0	100	1,938×10 ⁻⁵	412	
0,47	228	12÷14	—	1,070×10 ⁻⁵	232	
	540				1200	

ца IV
рых материалов (изоляторы)

Электриче- ская проч- ность $\frac{kV}{mm}$	Теплоем- кость $c \frac{Ws}{kG \cdot ^\circ C}$	Теплопро- водность $\lambda \frac{W}{cm \cdot ^\circ C}$	Временное сопроти- вление на разрыв кG/cm ²	Временное сопроти- вление сжатию кG/cm ²	Примечание
32÷45	—	0,0018	Основа 200÷350 Диагон. 150÷250	—	* Большие цифры для плотных сортов
8÷10	—	0,00136	Вдоль 650, поперек 350	—	
12÷17	Ок. 2000	0,00225	—	—	
15÷25	925	0,0030	1300÷1500	—	
4÷5	—	0,0025	Вдоль 700, поперек 450	1500	
9÷15	1790÷1870	0,0015	—	—	
12÷20	840÷920	0,010	300÷450	4000÷5000	
—	—	0,00022	—	—	
10	Ок. 2000	0,0009	Вдоль 600, поперек 300	—	
100÷150	—	0,0045	—	—	
20	—	0,001	1000	—	
6	Ок. 2000	—	1000	400	
5÷6	Ок. 2000	—	—	—	
25	—	0,0022	До 200	—	

Т а б л и ц а V

ОСТы электротехнические и некоторые другие, относящиеся к трансформаторам

№ ОСТа	Кем издан	Краткое название
515	ВКС	Международные электрические единицы
573	"	Математические обозначения
5850	"	Метрические меры
5578	"	Абсолютные магнитные единицы
5579	"	Основные обозначения, относящиеся к электромагнитному полю
5580	"	Обозначения в области переменных электрических токов
6896	"	Термины, обозначения и определения в области ферромагнитных явлений
7284	"	Обозначения графические условные для различных систем токов и способов соединения обмоток
7289	"	Обозначения графические условные для силовых трансформаторов, автотрансформаторов, потенциальных регуляторов
7771	"	Диэлектрики. Термины и обозначения
2690	"	Буквенные обозначения геометрических элементов на технических чертежах
6391	"	Сталь листовая, электротехническая
4876	"	Бумага для оклейки электротехнической стали
1443	"	Лента изоляционная, прорезиненная
4264	"	Слюда листовая
4760	"	Номинальные напряжения трехфазного тока 50 Hz от 500 V и выше
6393	"	Трансформаторы для питания ртутных выпрямителей металлической конструкции
8235	"	Трансформаторы тока; классификация
2070	"	Гайки, барашки для болтов с резьбой метрической диаметром 4 ÷ 24 mm
7656	"	Термины, относящиеся к трансформаторам тока
2524	"	Трансформаторы силовые масляные
8616	НКТП	Медь обмоточная ленточная и шинная
7569	"	Прутки из цветных металлов и сплавов круглые тянутые обычной точности протяжки
7571	"	Прутки из цветных металлов и сплавов круглые катаные
5726	"	Алюминий прямоугольного сечения, голый
7959	"	Масло трансформаторное
6321	НКЛес	Бумага кабельная, намоточная
8143	"	Бумага изоляционная
8144	"	Бумага изоляционная, пропиточная
2564	ГЭП	Автотрансформаторы пусковые масляные
2705	НКТП	Шкалы номинальных сил тока
2707	"	Трансформаторы напряжения до 35 kV включительно
8852	ВКС	Условные обозначения сварных швов
5037	"	Единицы частоты

№ ОСТа	Кем издан	Краткое название
5155	ВКС	Номинальные напряжения до 500 V для стационарных установок сильного тока общего пользования
8355	НКТП	Трансформаторы шахтные трехфазные взрывобезопасные
8555	„	Нагрев высоковольтных аппаратов при длительной работе
8091	ВКС	Медь красная
8112	„	Алюминий первичный
8032	„	Свинец чушковый

СССР Народный комиссариат тяжелой промышленности — — —	ОБЩЕСОЮЗНЫЙ СТАНДАРТ	ОСТ НКТП — 2524
	ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ МАСЛЯНЫЕ	Взамен ОСТ БКС — 4815/1 и 4815/2
	Определения. Технические условия. Испытания Power Transformers Definitions. Standard Specifications. Tests	Сильноточная электропромышленность

§ 1. Настоящий стандарт распространяется на предназначенные для длительной работы нормальные стационарные погруженные в масло понижающие и повышающие, трехфазные и однофазные, двухобмоточные и трехобмоточные силовые трансформаторы, применяемые для наружной и внутренней установки на высоте не выше 1000 м над уровнем моря.

П р и м е ч а н и е. Настоящий стандарт не распространяется на:

а) трансформаторы, предназначенные для реверсивной работы; трансформаторы со встроенным устройством для регулирования напряжения под нагрузкой; трансформаторы, предназначенные для работы с компенсаторами; трансформаторы для гидростанций;

б) трансформаторы особого назначения, как то: автотрансформаторы, пусковые автотрансформаторы, испытательные трансформаторы; трансформаторы для ртутных выпрямителей, для электропечей, для сварочных аппаратов, для передвижных станций и подстанций и для иного специального назначения;

в) трансформаторы, заполненные пиролом.

А. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

§ 2. Двухобмоточным трансформатором называется трансформатор, содержащий две электрически не связанные между собой обмотки: обмотку высшего напряжения (ВН), присоединяемую к сети более высокого напряжения, и обмотку низшего напряжения (НН), присоединяемую к сети более низкого напряжения.

Трехобмоточным трансформатором называется трансформатор, содержащий три электрически не связанные между собой обмотки: обмотку высшего напряжения (ВН), обмотку среднего напряжения (СН) и обмотку низшего напряжения (НН).

Понижающим трансформатором называется трансформатор, в котором первичной обмоткой является обмотка ВН.

Повышающим трансформатором называется трансформатор, в котором первичной обмоткой является обмотка НН.

Первичной обмоткой называется та из обмоток трансформатора, к которой электрическая энергия подводится.

Внесен Главэнергопромом. Утвержден 7/VIII 1936 г. как обязательный с 1/I 1937 г. для всех стандартизуемых трансформаторов, кроме: 1) трехфазных двухобмоточных трансформаторов номинальной мощностью в 135, 240, 420, 750, 1350, 2400 и 4200 kVA, для которых стандарт обязателен с 1/I 1938 г., и 2) однофазных трансформаторов номинальной мощностью в 30 000 и 40 000 kVA, для которых стандарт обязателен с 1/IV 1938 г.

Вторичной обмоткой называется та из обмоток трансформатора, от которой электрическая энергия отводится.

Примечание. Обмотка СН трехобмоточного трансформатора рассматривается как вторичная.

§ 3. Указанные на табличке трансформатора и называемые номинальными мощность, частота, режим работы и особо отмеченные напряжения и токи определяют номинальные условия работы (номинальный режим) трансформатора.

Примечание. Из имеющихся на обмотках трансформатора ответвлений (см. § 17 и 18) номинальным значениям напряжения и тока соответствует лишь одно особо отмеченное на табличке ответвление (основной вывод).

§ 4. Первичным напряжением называется указанное на табличке напряжение, которое должно подводиться к зажимам первичной обмотки (первичным зажимам) трансформатора.

Вторичным напряжением называется указанное на табличке напряжение, которое должно устанавливаться на зажимах вторичной обмотки (вторичных зажимах) трансформатора при холостом ходе и номинальном первичном напряжении на зажимах основного вывода.

Коэффициентом трансформации называется отношение номинальных напряжений: обмоток ВН и НН — в двухобмоточном трансформаторе, и каждой пары обмоток ВН и НН, ВН и СН, СН и НН — в трехобмоточном трансформаторе.

§ 5. Номинальными токами, первичным и вторичным, называются токи, определяемые из соответствующих номинальных значений мощности и напряжений.

§ 6. Под мощностью трансформатора понимается выраженная в киловольтамперах кажущаяся мощность его.

Указанная на табличке номинальная мощность трансформатора представляет собой условную расчетную мощность его. Отдаваемая трансформатором мощность при номинальном токе меньше номинальной мощности на величину, соответствующую изменению вторичного напряжения при переходе от холостого хода к полной нагрузке.

Примечание. За номинальную мощность трехобмоточного трансформатора принимается мощность наиболее мощной обмотки его.

§ 7. Изменением напряжения трансформатора при заданном коэффициенте мощности называется выраженная в процентах номинального вторичного напряжения разность между номинальным вторичным напряжением и напряжением, устанавливаемым на зажимах основного вывода вторичной обмотки при номинальных: вторичном токе, частоте и первичном напряжении.

Примечание. Изменение напряжения приводится к условной температуре обмоток 75°.

§ 8. Под номинальной частотой тока в настоящем стандарте понимается частота в 50 Hz.

§ 9. Напряжением короткого замыкания двухобмоточного трансформатора или любой пары обмоток трехобмоточного трансформатора (при разомкнутой третьей обмотке) называется напряжение, которое при номинальной частоте и температуре обмоток в 75° следует подвести к зажимам основного вывода одной из обмоток, при другой замкнутой на-коротко, чтобы в них установились номинальные токи.

Примечание. Напряжение короткого замыкания выражается в процентах номинального напряжения.

§ 10. Током холостого хода называется ток, который при номинальных напряжении и частоте устанавливается в одной из обмоток при разомкнутой другой обмотке.

Примечание 1. Ток холостого хода выражается в процентах номинального тока.

Примечание 2. В трехфазном трансформаторе значение тока холостого хода определяется как среднее арифметическое фазных токов холостого хода.

Примечание 3. Ток холостого хода трехобмоточного трансформатора выражается в процентах от тока, соответствующего номинальной мощности трансформатора.

§ 11. Под потерями в трансформаторе понимаются потери холостого хода, определяемые опытом холостого хода, и потери короткого замыкания, определяемые опытом короткого замыкания.

Примечание 1. Потери короткого замыкания приводятся к условной температуре обмоток 75° .

Примечание 2. Опыты холостого хода и короткого замыкания производятся согласно особому ОСТ на методы испытания трансформаторов.

§ 12. Коэффициентом полезного действия трансформатора (при номинальной нагрузке его) называется отношение произведения номинальной мощности на коэффициент мощности вторичной цепи к сумме этого произведения и потерь холостого хода и короткого замыкания.

Примечание. Коэффициент полезного действия приводится к условной температуре обмоток 75° .

§ 13. Длительной нагрузкой называется нагрузка, продолжительность которой настолько велика, что наблюдаемая температура трансформатора, при неизменной температуре окружающей среды, достигает установившегося состояния.

Кратковременной нагрузкой называется такая нагрузка, при которой наблюдаемая температура трансформатора, при неизменной температуре окружающей среды, не успевает за время работы достичь установившегося состояния.

Б. ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ

I. Схемы и группы соединения обмоток

§ 14. а) Схемы соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов:

Схемы соединения обмоток		Диаграммы векторов		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	
				$Y/Y_0 - 12$
				$Y/\Delta - 11$
				$Y_0/\Delta - 11$

б) Схема соединения обмоток однофазных двухобмоточных трансформаторов, включаемых в трехфазную группу:

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				$1/1 - 12$

в) Схема соединения обмоток трехфазных трехобмоточных трансформаторов:

Схема соединения обмоток			Диаграмма векторов			Условное обозначение
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
						$Y_0/Y_0/\Delta -12-11$

г) Схема соединения обмоток однофазных трехобмоточных трансформаторов, включаемых в трехфазную группу:

Схема соединения обмоток			Диаграмма векторов			Условное обозначение
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
						$1/1/1-12-12$

Примечание 1. Все схемы соединения обмоток показаны со стороны выводов обмотки ВН.

Примечание 2. Обозначения Y/Y_0-12 , $Y/\Delta-11$, $Y_0/\Delta-11$ и $Y_0/Y_0/\Delta-12-11$ указывают схемы и группы соединения обмоток трансформаторов и угловое смещение векторов электродвижущих сил обмоток СН и НН по отношению к таковым обмотки ВН.

В этих обозначениях Y обозначает соединение звездой, Δ — соединение треугольником, а индекс 0 — вывод нулевой точки. Первый знак обозначения относится к обмотке ВН, последний — к обмотке НН; в обозначении для трехобмоточных трансформаторов средний (второй) знак относится к обмотке СН.

Угловое смещение векторов электродвижущих сил обмоток НН и СН по отношению к таковым обмотки ВН обозначено числом, которое при умножении на 30° — угловое смещение, принятое за единицу, — дает угол смещения в градусах: число 11 указывает угловое смещение в 330° , а число 12 — угловое смещение в 360° или, что то же, в 0° .

В обозначении для трехобмоточных трансформаторов группа соединения 12 относится к обмоткам, соединенным по схеме Y/Y, а группа 11 — к обмоткам, соединенным по схеме Y/ Δ .

Примечание 3. Для трехобмоточных трансформаторов с напряжением обмотки ВН в 220 kV допускается соединение обмоток и по схеме $Y_0/\Delta/\Delta$.

§ 15. Трехфазные двухобмоточные трансформаторы, в зависимости от мощности и напряжения обмоток, изготавлиются по следующим схемам:

Обозначение схемы. соединения обмоток	Напряжение обмоток		Мощность
	ВН	НН	
Y/Y ₀ — 12	До 35 kV	230 V	До 1000 kVA
	До 35 kV	400 V	До 1800 kVA
Y/Δ — 11	До 35 kV	133 V	До 560 kVA
		525 V	До 1800 kVA
		Выше 525 V	До 5600 kVA
Y ₀ /Δ — 11	110 kV и выше	3150 V и выше	3200 kVA и выше
	6 kV и выше	3150 V и выше	7500 kVA и выше

Примечание 1. Ток нейтрали трансформаторов, обмотки которых соединены по схеме Y/Y₀ — 12, не должен превышать 25% номинального тока обмотки НН, причем фазный ток не должен превышать номинальный.

Примечание 2. По требованию заказчика нуль выводится со стороны ВН также и для мощностей от 1800 до 5600 kVA при напряжении 35 kV.

II. Параметры трансформаторов

§ 16. Номинальные мощности и напряжения обмоток трансформаторов приведены в табл. 1—4.

Номинальные мощности отдельных обмоток трехобмоточного трансформатора в процентах от его номинальной мощности составляют:

№. п/п	Номинальная мощность обмотки %		
	ВН	СН	НН
1	100	100	100
2	100	100	66,7
3	100	66,7	100
4	100	66,7	66,7

Номинальные мощности и напряжения трех

	Номиналь- ная мощность kVA	Номинальные напряжения обмотки ВН										
		kV										
Понижающие трансформаторы	5	0,380	0,500	3	6	—	10	—	—	—	—	—
	10	0,380	0,500	3	6	—	10	—	—	—	—	—
	20	0,380	0,500	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	30	0,380	0,500	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	50	0,380	0,500	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	75	—	0,500	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	100	—	0,500	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	135	—	—	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	180	—	—	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	240	—	—	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	320	—	—	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	420	—	—	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	560	—	—	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	750	—	—	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	1000	—	—	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	1350	—	—	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	1800	—	—	3	6	—	10	—	—	35	—	—
	2400	—	—	—	6	—	10	—	—	35	—	—
	3200	—	—	—	6	—	10	—	—	35	110	—
	4200	—	—	—	6	—	10	—	—	35	—	—
	5600	—	—	—	6	—	10	—	—	35	110	—
	7500	—	—	—	—	6,3	—	10,5	15,75	35	110	—
Повышающие трансформаторы	10000	—	—	—	—	6,3	—	10,5	15,75	35	110	—
	15000	—	—	—	—	—	—	10,5	15,75	35	110	—
	20000	—	—	—	—	—	—	—	—	35	110	220
	31500	—	—	—	—	—	—	—	—	35	110	220
	3200	—	—	—	—	—	—	—	—	38,5	121	—
	5600	—	—	—	—	—	—	—	—	38,5	121	—
	7500	—	—	—	—	—	—	—	—	38,5	121	—
	10000	—	—	—	—	—	—	—	—	38,5	121	—
	15000	—	—	—	—	—	—	—	—	38,5	121	—
	20000	—	—	—	—	—	—	—	—	38,5	121	—
	31500	—	—	—	—	—	—	—	—	38,5	121	242

Примечание 1. На номинальные напряжения обмотки НН в 3,3, 6,6 и 11 kV лишь при номинал ном напряжении обмотки ВН в 35 kV и выше.

Примечание 2. Понижающие трансформаторы номинальной мощностью в 3200 ные напряжения обмотки НН в 3,3; 6,6; 11 и 38,5 kV.

Таблица 1

фазных двухобмоточных трансформаторов

Номинальные напряжения обмотки НН kV												Номиналь- ная мощность kVA
0,133	0,230	0,400	—	—	—	—	—	—	—	—	—	5
0,133	0,230	0,400	—	—	—	—	—	—	—	—	—	10
0,133	0,230	0,400	—	—	—	—	—	—	—	—	—	20
0,133	0,230	0,400	—	—	—	—	—	—	—	—	—	30
0,133	0,230	0,400	—	—	—	—	—	—	—	—	—	50
0,133	0,230	0,400	—	—	—	—	—	—	—	—	—	75
0,133	0,230	0,400	0,525	—	—	—	—	—	—	—	—	100
0,133	0,230	0,400	0,525	—	—	—	—	—	—	—	—	135
0,133	0,230	0,400	0,525	3,15	—	—	—	—	—	—	—	180
0,133	0,230	0,400	0,525	3,15	—	—	—	—	—	—	—	240
0,133	0,230	0,400	0,525	3,15	—	6,3	—	—	—	—	—	320
0,133	0,230	0,400	0,525	3,15	—	6,3	—	—	—	—	—	420
0,133	0,230	0,400	0,525	3,15	—	6,3	—	—	—	—	—	560
—	0,230	0,400	0,525	3,15	—	6,3	—	—	—	—	—	750
—	0,230	0,400	0,525	3,15	—	6,3	—	10,5	—	—	—	1000
—	—	0,400	0,525	3,15	—	6,3	—	10,5	—	—	—	1350
—	—	0,400	0,525	3,15	—	6,3	—	10,5	—	—	—	1800
—	—	—	—	3,15	3,3	6,3	6,6	10,5	11	—	—	2400
—	—	—	—	3,15	3,3	6,3	6,6	10,5	11	38,5	—	3200
—	—	—	—	3,15	3,3	6,3	6,6	10,5	11	38,5	—	4200
—	—	—	—	3,15	3,3	6,3	6,6	10,5	11	38,5	—	5600
—	—	—	—	—	3,3	—	6,6	—	11	38,5	—	7500
—	—	—	—	—	3,3	—	6,6	—	11	38,5	—	10000
—	—	—	—	—	3,3	—	6,6	—	11	38,5	—	15000
—	—	—	—	—	—	—	6,6	—	11	38,5	—	20000
—	—	—	—	—	—	—	6,6	—	11	38,5	121	31500
—	—	—	—	3,15	—	6,3	—	10,5	—	—	—	3200
—	—	—	—	3,15	—	6,3	—	10,5	—	—	—	5600
—	—	—	—	3,15	—	6,3	—	10,5	—	—	—	7500
—	—	—	—	3,15	—	6,3	—	10,5	—	—	—	10000
—	—	—	—	3,15	—	6,3	—	10,5	—	—	—	15000
—	—	—	—	—	—	6,3	—	10,5	—	—	—	20000
—	—	—	—	—	—	6,3	—	10,5	—	—	—	31500

изготавливаются понижающие трансформаторы номинальной мощностью в 2400, 3200, 4200 и 5600 kVA
и 5600 kVA с номинальным напряжением обмотки ВН в 110 kV изготавливаются только на номиналь-

Номинальные мощности и напряжения одно

	Номиналь- ная мощ- ность kVA	Номинальные напряжения обмотки ВН kV						
		3	6	10	—	35	—	—
Понижающие транс- форматоры	(600)	—	6	10	—	35	—	—
	(1067)	—	6	10	—	35	—	—
	(1867)	—	6	10	—	35	—	—
	(3333)	—	6	10,5	15,75	35	110	—
	(5000)	—	6	10,5	15,75	35	110	—
	6667	—	—	—	—	35	110	—
	10500	—	—	—	—	35	110	—
	13500	—	—	—	—	35	110	220
	20000	—	—	—	—	35	110	220
	30000	—	—	—	—	—	—	220
	40000	—	—	—	—	—	—	220
Повышающие трансформаторы	(3333)	—	—	—	—	38,5	121	—
	(5000)	—	—	—	—	38,5	121	—
	6667	—	—	—	—	38,5	121	—
	10500	—	—	—	—	38,5	121	—
	13500	—	—	—	—	38,5	121	242
	20000	—	—	—	—	38,5	121	242
	30000	—	—	—	—	38,5	121	242
	40000	—	—	—	—	38,5	121	242

Примечание 1. Приведенные в таблице номинальные напряжения представляют при соединении обмоток ВН звездой и обмоток НН треугольником; однако при напряжении

Примечание 2. Однофазные трансформаторы мощностью в 600, 1067, 1867, 3333 тяжелыми условиями транспорта.

Номинальные мощности и напряжения трех

	Номинальная мощность kVA	Номинальные напря- жения обмотки ВН kV	
Понижаю- щие транс- форматоры	5600	110	—
	7500	110	—
	10000	110	—
	15000	110	—
	20000	110	220
	31500	110	220
Повышаю- щие транс- форматоры	5600	121	—
	7500	121	—
	10000	121	—
	15000	121	—
	20000	121	—
	31500	121	242

Таблица 2

фазных двухобмоточных трансформаторов

Номинальные напряжения обмотки НН kV								
0,400	0,525	3,15	—	6,3	—	10,5	—	—
—	—	3,15	3,3	6,3	6,6	10,5	—	—
—	—	3,15	3,3	6,3	6,6	10,5	—	—
—	—	—	3,3	—	6,6	11	38,5	—
—	—	—	3,3	—	6,6	11	38,5	—
—	—	—	—	—	6,6	11	38,5	—
—	—	—	—	—	6,6	11	38,5	—
—	—	—	—	—	6,6	11	38,5	121
—	—	—	—	—	—	11	38,5	121
—	—	—	—	—	—	—	—	121
—	—	—	—	—	—	—	—	121
—	—	3,15	—	6,3	—	10,5	—	—
—	—	3,15	—	6,3	—	10,5	—	—
—	—	—	—	6,3	—	10,5	—	—
—	—	—	—	6,3	—	10,5	—	—
—	—	—	—	6,3	—	10,5	—	110
—	—	—	—	6,3	—	10,5	15,75	110
—	—	—	—	—	—	10,5	15,75	110
—	—	—	—	—	—	—	15,75	110

собой линейные напряжения трехфазных сетей, в которых работают однофазные трансформаторы обмотки НН 400 V схема соединения трехфазной группы согласовывается особо.

и 5000 kVA (в скобках) допускаются к изготовлению для торфоразработок и местностей с особо

Таблица 3

фазных трехобмоточных трансформаторов

Номинальные напряжения обмотки СН kV		Номинальные напряжения обмотки НН kV		
38,5	—	3,3	6,6	11
38,5	—	3,3	6,6	11
38,5	—	3,3	6,6	11
38,5	—	3,3	6,6	11
38,5	—	—	6,6	11
38,5	121	—	6,6	11
38,5	—	3,15	6,3	10,5
38,5	—	3,15	6,3	10,5
38,5	—	3,15	6,3	10,5
38,5	—	3,15	6,3	10,5
38,5	—	—	6,3	10,5
38,5	121	—	6,3	10,5

Таблица 4

Номинальные мощности и напряжения однофазных трехобмоточных трансформаторов

	Номиналь- ная мощ- ность kVA	Номинальные напряжения обмотки ВН kV		Номинальные напряжения обмотки СН kV		Номинальные напряжения обмотки НН kV			
Понижающие трансформаторы	(3333)	110	—	38,5	—	3,3	6,6	11	—
	(5000)	110	—	38,5	—	3,3	6,6	11	—
	6667	110	—	38,5	—	—	6,6	11	—
	10500	110	—	38,5	—	—	6,6	11	—
	13500	110	220	38,5	—	—	6,6	11	—
	20000	110	220	38,5	121	—	6,6	11	—
	30000	—	220	—	121	—	—	11	38,5
	40000	—	220	—	121	—	—	11	38,5
Повышающие трансформаторы	(3333)	121	—	38,5	—	3,15	6,3	10,5	—
	(5000)	121	—	38,5	—	3,15	6,3	10,5	—
	6667	121	—	38,5	—	—	6,3	10,5	—
	10500	121	—	38,5	—	—	6,3	10,5	—
	13500	121	242	38,5	—	—	6,3	10,5	—
	20000	121	242	38,5	121	—	6,3	10,5	15,75
	30000	121	242	38,5	121	—	—	10,5	15,75
	40000	121	242	38,5	121	—	—	—	15,75

Примечание 1. Приведенные в таблице номинальные напряжения представляют собой линейные напряжения трехфазных сетей, в которых работают однофазные трансформаторы при соединении обмотки ВН звездой, обмотки НН — треугольником и обмотки СН при ВН 110 kV — звездой, а при ВН 220 kV — звездой или треугольником.

Примечание 2. Однофазные трансформаторы мощностью в 3333 и 5000 kVA (в скобках) допускаются к изготовлению для местностей с особо тяжелыми условиями транспорта.

III. Регулирование напряжений

§ 17. Обмотки ВН двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов и обмотка СН трехобмоточных трансформаторов снабжаются ответвлениями, служащими исключительно для регулирования и поддержания вторичного номинального напряжения, которое не должно быть превышено. Самое переключение на эти ответвления может производиться лишь по отключении трансформатора от сети.

Превышение напряжения, подводимого к зажимам основного вывода или какого-либо ответвления первичной обмотки, не должно превосходить + 5% от напряжения, указанного на табличке для основного вывода или для данного ответвления, при сохранении соответствующего ему тока.

§ 18. Пределы регулирования напряжения и число ответвлений для трансформаторов устанавливаются следующие:

- а) Два ответвления (на + 5% и на — 5%) имеют:
 - 1) обмотки ВН понижающих трехфазных трансформаторов мощностью до 5600 kVA и напряжением до 35 kV;

2) обмотки ВН и СН трансформаторов с номинальным током обмотки в 551 А и выше.

б) Четыре ответвления (на + 5%; + 2,5%; — 2,5% и — 5%) имеют обмотки ВН и СН всех прочих предусмотренных настоящим стандартом трансформаторов.

Примечание. В трансформаторах с номинальным напряжением обмотки ВН 110 и 121 kV должна быть предусмотрена возможность перепайки этой обмотки на следующие варианты четырех ответвлений:

- а) + 2,5%; — 2,5%; — 5% и — 7,5%;
- б) — 2,5%; — 5%; — 7,5% и — 10%.

В этих случаях при работе трансформатора на ответвлениях — 7,5% и — 10% номинальный ток снижается соответственно на 2,5 и 5%.

§ 19. Переключение с одного ответвления на другое производится:

- а) для трансформаторов с напряжением обмотки ВН 380 и 500 V — по снятии крышки бака, но без подъема выемной части;
- б) для трансформаторов номинальной мощностью до 100 kVA с напряжением обмотки ВН выше 500 V и до 6,3 kV — внутри бака по снятию люка, но без спуска масла;
- в) во всех остальных случаях переключение производится снаружи, без съема крышки.

§ 20. Напряжения на зажимах ответвлений обмоток ВН и СН двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов при соответствующих номинальных напряжениях (на зажимах основного вывода) приведены в табл. 5.

Таблица 5

Напряжения ответвлений
kV

Отвѣтвле- ния (№ п/п)	Обмотки ВН двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов												Обмотки СН трехобмоточ- ных транс- форматоров повышаю- щих и пони- жающих	
	понижающих									повышающих				
1	3,15	6,3	6,6	10,5	11	16,54	36,75	115,5	231	40,4	127,05	254,1	40,4	127,05
2	—	—	—	—	10,75	16,14	35,87	112,75	225,5	39,46	124,02	248,05	39,46	124,02
Основной вывод	3	6	6,3	10	10,5	15,75	35	110	220	38,5	121	242	38,5	121
3	—	—	—	—	10,25	15,36	34,13	107,25	214,5	37,54	117,98	235,95	37,54	117,98
4	2,85	5,7	6	9,5	10	14,96	33,25	104,5	209	36,6	114,95	229,9	36,6	114,95

IV. Характеристики трансформаторов

§ 21. Потери, коэффициент полезного действия, изменение напряжения, ток холостого хода и напряжение короткого замыкания трехфазных и однофазных двухобмоточных трансформаторов приведены в табл. 6 и 7

Примечание 1. Характеристики двухобмоточных трансформаторов при номинальном напряжении обмотки ВН выше 110 или 121 kV устанавливаются в каждом отдельном случае по особому соглашению.

Примечание 2. Коэффициент полезного действия двухобмоточного трансформатора при заданной нагрузке определяется по формуле:

$$\eta = \frac{\beta P \cos \varphi_2}{\beta P \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k} \cdot 100,$$

- где η — коэффициент полезного действия в процентах,
 β — отношение заданной нагрузки к номинальной,
 P — номинальная мощность в киловольтамперах,
 $\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности вторичной цепи,
 P_0 — измеренные потери холостого хода в киловаттах,
 P_k — измеренные потери короткого замыкания в киловаттах, отнесенные к номинальной мощности.

Примечание 3. Изменение напряжения в двухобмоточных трансформаторах при заданной нагрузке определяется по формуле:

$$\Delta E = \beta (e_a \cos \varphi_2 + e_r \sin \varphi_2) + \frac{\beta^2}{200} (e_a \sin \varphi_2 - e_r \cos \varphi_2)^2,$$

где e_a — активная составляющая напряжения короткого замыкания в процентах:

$$e_a = \frac{P_k}{P} \cdot 100,$$

e_r — реактивная составляющая напряжения короткого замыкания в процентах:

$$e_r = \sqrt{e_k^2 - e_a^2}$$

(значения β , P_k и P см. примечание 2, e_k — напряжение короткого замыкания в процентах номинального напряжения, отнесенное к номинальной мощности).

Таблица 6

Характеристики трехфазных двухобмоточных трансформаторов

Номинальная мощность	Верхний предел номинального напряжения обмоток		Потери		Коэффициент полезного действия при $\cos \varphi_2 = 1$		Изменение напряжения при номинальной нагрузке и $\cos \varphi_2 = 1$	Напряжение короткого замыкания в процентах номинального напряжения	Ток холостого хода в процентах номинального тока	Номинальная мощность
	ВН	НН	холостого хода при номинальном напряжении	короткого за- мыкания при номинальной нагрузке	при номи- нальной нагрузке	при $1/2$ но- минальной нагрузке				
										kVA
5	6,3	0,400	60	185	95,33	95,92	3,8	5,5	10	5
	10	0,400	90	185	94,8	94,9	3,8	5,5	10	
10	6,3	0,400	105	335	95,79	96,36	3,45	5,5	10	10
	10	0,400	140	335	95,47	95,71	3,45	5,5	10	
20	6,3	0,400	180	600	96,25	96,81	3,1	5,5	9	20
	10	0,400	220	600	96,06	96,43	3,1	5,5	10	
	35	0,400	270	600	95,83	95,97	3,15	6,5	10	
30	6,3	0,400	250	850	96,46	97,01	2,95	5,5	8	30
	10	0,400	300	850	96,31	96,69	2,95	5,5	9	
	35	0,400	360	850	96,12	96,32	3	6,5	10	
50	6,3	0,400	350	1325	96,75	97,32	2,75	5,5	7	50
	10	0,400	440	1325	96,59	97,01	2,75	5,5	8	
	35	0,400	540	1325	96,40	96,64	2,85	6,5	9	
75	6,3	0,400	490	1875	96,94	97,51	2,6	5,5	6,5	75
	10	0,400	590	1875	96,82	97,25	2,6	5,5	7,5	
	35	0,400	720	1875	96,66	96,93	2,7	6,5	8,5	
100	6,3	0,525	600	2400	97,09	97,66	2,5	5,5	6,5	100
	10	0,525	730	2400	96,96	97,41	2,5	5,5	7,5	
	35	0,525	900	2400	96,81	97,09	2,6	6,5	8	
135	6,3	0,525	830	3070	97,19	97,69	2,4	5,5	6,5	135
	10	0,525	1000	3150	97,02	97,42	2,46	5,5	7,5	
	35	0,525	1300	3150	96,81	97,01	2,52	6,5	8	
180	6,3	0,525	1000	4000	97,3	97,83	2,35	5,5	6	180
	10	0,525	1200	4100	97,14	97,59	2,4	5,5	7	
	10	3,3	1500	4100	96,97	97,27	2,4	5,5	7,5	
	35	3,3	1500	4100	96,97	97,27	2,45	6,5	8	
240	6,3	0,525	1400	4900	97,44	97,86	2,17	5,5	6	240
	10	0,525	1600	5100	97,28	97,66	2,25	5,5	7	
	10	3,3	1900	5100	97,17	97,43	2,25	5,5	7,5	
	35	3,3	1900	5100	97,17	97,43	2,31	6,5	8	
320	6,3	0,525	1600	6070	97,66	98,09	2,05	5,5	6	320
	10	0,525	1900	6200	97,54	97,89	2,05	5,5	7	
	10	6,6	2300	6200	97,41	97,65	2,05	5,5	7,5	
	35	6,6	2300	6200	97,41	97,65	2,15	6,5	7,5	

Таблица 6 (продолжение)

Номинальная мощность	Верхний предел номинального напряжения обмоток		Потери		Коэффициент полезного действия при $\cos \varphi_2 = 1$		Изменение напряжения при номинальной нагрузке и $\cos \varphi_2 = 1$ %	Напряжение короткого замыкания в процентах номинального напряжения	Ток холостого хода в процентах номинального тока	Номинальная мощность
	ВН	НН	холостого хода при номинальном напряжении	короткого замыкания при номинальной нагрузке	при номинальной нагрузке	при 1/2 номинальной нагрузке				
										kV
420	6,3	0,525	2100	7300	97,81	98,17	1,88	5,5	5,5	420
	10	0,525	2300	7700	97,67	98,03	1,96	5,5	6,5	
	10	6,6	2750	7700	97,57	97,82	1,96	5,5	7	
	35	6,6	2750	7700	97,57	97,82	2,02	6,5	7	
560	6,3	0,525	2500	8960	97,99	98,33	1,75	5,5	5	560
	10	0,525	2800	9400	97,87	98,19	1,8	5,5	6	
	10	6,6	3350	9400	97,77	98	1,8	5,5	6,5	
	35	6,6	3350	9400	97,77	98	1,85	6,5	6,5	
750	10	6,6	4100	11900	97,91	98,15	1,73	5,5	6	750
	35	10,5	4600	11900	97,85	98,02	1,79	6,5	6,5	
1000	10	6,6	4900	15000	98,05	98,3	1,64	5,5	5	1000
	35	10,5	5100	15000	98,03	98,26	1,7	6,5	5,5	
1350	10	6,6	6000	19500	98,15	98,42	1,59	5,5	5	1350
	35	10,5	6500	19500	98,11	98,32	1,65	6,5	5,5	
1800	10	6,6	8000	24000	98,25	98,47	1,47	5,5	4,5	1800
	35	10,5	8300	24000	98,24	98,43	1,53	6,5	5	
2400	10	6,6	9200	31500	98,33	98,6	1,45	5,5	4,5	2400
	35	10,5	10000	31500	98,3	98,53	1,51	6,5	5	
3200	10	6,6	11000	37000	98,52	98,75	1,3	5,5	4	3200
	33,5	11	11500	37000	98,51	98,72	1,4	7	4,5	
	121	38,5	16600	39500	98,28	98,37	1,78	10,5	4,5	
4200	10	6,6	14000	47000	98,57	98,79	1,27	5,5	4	4200
	38,5	11	14500	47000	98,56	98,76	1,4	7	4,5	
5600	10	6,6	18000	56000	98,7	98,87	1,11	5,5	4	5600
	38,5	11	18500	57000	98,67	98,84	1,3	7,5	4,5	
	121	38,5	25500	62500	98,45	98,55	1,67	10,5	4,5	
7500	38,5	11	24000	75000	98,7	98,87	1,25	7,5	3,5	7500
	121	38,5	33000	77000	98,55	98,62	1,58	10,5	4	
10000	38,5	11	29000	92000	98,8	98,97	1,2	7,5	3	10000
	121	38,5	38500	97500	98,66	98,76	1,53	10,5	3,5	
15000	38,5	11	39000	122000	98,93	99,03	1,1	8	3	15000
	121	38,5	50000	133000	98,79	98,9	1,44	10,5	3,5	
20000	38,5	11	48000	148000	99,3	99,15	1	8	2,5	20000
	121	38,5	60000	163000	98,9	98,94	1,37	10,5	3	
31500	38,5	11	73000	180000	99,2	99,25	0,9	8	2	31500
	121	38,5	86000	200000	99,1	99,14	1,19	10,5	2,5	

Таблица 7

Характеристики однофазных двухобмоточных трансформаторов

Номинальная мощность	Верхний предел номинального напряжения обмоток		Потери		Коэффициент полезного действия		Изменение напряжения при номинальной нагрузке и $\cos \varphi_2 = 1$ %	Напряжение короткого замыкания в процентах номинального напряжения	Ток холостого хода в процентах номинального тока	Номинальная мощность
	ВН	НН	холостого хода при номинальном напряжении	короткого замыкания при номинальной нагрузке	при номинальной нагрузке	при 1/2 номинальной нагрузке				
kVA	kV	kV	kW	kW						kVA
(600)	35	10,5	3,2	9,5	97,93	98,17	1,79	6,5	5,5	(600)
(1067)	38,5	11	5	14,5	98,2	98,41	1,59	7	5	(1067)
(1867)	38,5	11	7,3	22	98,45	98,65	1,45	7,5	4,5	(1867)
(3333)	121	38,5	13,6	34,2	98,50	98,69	1,52	10,5	4,5	(3333)
(5000)	38,5	11	14	45	98,83	98,99	1,18	8	4	(5000)
	121	38,5	18	47	98,62	98,82	1,49	10,5	4	
6667	38,5	11	17	53,5	98,95	99,09	1,08	8	3,5	6667
	121	38,5	24	56	98,81	98,87	1,39	10,5	3,5	
10500	38,5	11	23,5	77	99,05	99,19	1,01	7,5	3	10500
	121	38,5	29,5	81,5	98,96	99,08	1,33	10,5	3	
13500	121	38,5	33,5	98,5	99,03	99,15	1,28	10,5	3	13500
20000	121	38,5	47	129	99,13	99,21	1,20	10,5	2,5	20000
30000	121	38,5	66	172	99,21	99,28	1,12	10,5	2,5	30000
40000	121	38,5	84	216	99,25	99,31	1,09	10,5	2,5	40000

Примечание. Для определения потерь в трехфазной группе указанные в таблице потери следует умножить на 3.

§ 22. Потери холостого хода, максимальные потери короткого замыкания, коэффициент полезного действия и ток холостого хода трехфазных и однофазных трехобмоточных трансформаторов приведены в табл. 8, 9 и 10.

Примечание 1. Трехобмоточные трансформаторы рассчитаны для таких нагрузок, при которых арифметическая полусумма мощностей (в киловольтамперах) всех трех обмоток не превышает номинальной мощности трансформатора и ни одна из обмоток не нагружена выше своей номинальной мощности.

Примечание 2. Характеристики трехобмоточных трансформаторов при напряжении обмотки ВН выше 110 или 121 kV устанавливаются в каждом отдельном случае по особому соглашению.

Таблица 8

Характеристики трехфазных трехобмоточных трансформаторов

Номи- нальная мощность	Вспомогатель- ные обозначе- ния таблицы 10	Верхний предел номинального напряжения обмоток			Потери		Коэффициент полезного дей- ствия, соответ- ствующий мак- симальным поте- рям и $\cos \varphi_2 = 1$	Ток холостого хода в процен- тах номиналь- ного тока
		ВН	СН	НН	холостого хода при номиналь- ном напряже- нии	короткого замыка- ния максимальные при нормальной на- грузке обмотки ВН		
kVA		kV	kV	kV	kW	kW	%	
5600	I	121	38,5	11	30	69,5	98,25	5
	II	121	38,5	11	29	69,5	98,25	
	III	121	38,5	11	29	61	98,4	
7500	I	121	38,5	11	35	82	98,42	4,6
	II	121	38,5	11	35,5	81,5	98,42	
	III	121	38,5	11	35,5	71	98,60	
10000	I	121	38,5	11	45	97	98,60	4,4
	II	121	38,5	11	43	97	98,60	
	III	121	38,5	11	43	89	98,70	
15000	I	121	38,5	11	60	132	98,74	4
	II	121	38,5	11	59	132	98,74	
	III	121	38,5	11	59	120	98,82	
20000	I	121	38,5	11	76	163	98,85	3,5
	II	121	38,5	11	75	163	98,85	
	III	121	38,5	11	75	148	98,92	
31500	I	121	38,5	11	110	233	98,94	3
	II	121	38,5	11	105	233	98,94	
	III	121	38,5	11	105	208	99,03	

Таблица 9

Характеристики однофазных трехобмоточных трансформаторов

Номинальная мощность	Вспомогательные обозначения таблицы 10	Верхний предел номи- нального напряжения обмоток			Потери		Коэффициент полезного дей- ствия, соот- ветствующий максимальным потерям и $\cos \varphi_2 = 1$	Ток холостого хода в процентах номи- нального тока
		ВН	СН	НН	холостого хода при но- минальном напряжении	короткого за- мыкания мак- симальные при номиналь- ной нагрузке обмотки ВН		
kVA		kV	kV	kV	kW	kW	%	
(3333)	I	121	38,5	11	15	42	98,33	4,4
	II	121	38,5	11	14,5	42	98,33	
	III	121	38,5	11	14,5	37,5	98,47	
(5000)	I	121	38,5	11	20,5	54,5	98,52	4,2
	II	121	38,5	11	20,5	54,5	98,52	
	III	121	38,5	11	20,5	48,5	98,64	
6667	I	121	38,5	11	27	66	98,63	4
	II	121	38,5	11	25	66	98,63	
	III	121	38,5	11	25	59	98,75	
10500	I	121	38,5	11	35,5	96,5	98,76	3,6
	II	121	38,5	11	32,5	96,5	98,79	
	III	121	38,5	11	32,5	87	98,88	
13500	I	121	38,5	11	41	116	98,85	3
	II	121	38,5	11	38,5	116	98,87	
	III	121	38,5	11	38,5	103,5	98,96	
20000	I	121	38,5	15,75	59	147	98,98	2,8
	II	121	38,5	15,75	55	147	99,00	
	III	121	38,5	15,75	55	131	99,08	
30000	I	121	38,5	15,75	80	200	99,08	2,7
	II	121	38,5	15,75	74	200	99,10	
	III	121	38,5	15,75	74	180	99,17	
40000	I	121	38,5	15,75	100	248	99,14	2,6
	II	121	38,5	15,75	93	248	99,15	
	III	121	38,5	15,75	93	220	99,22	

Примечание. Однофазные трансформаторы мощностью в 3333 и 5000 kVA допускаются к изготовлению для местностей с особо тяжелыми условиями транспорта.

Таблица 10

Напряжение короткого замыкания трехобмоточных трансформаторов

Мощности обмоток трехобмоточ- ного трансформатора в процен- тах номинальной мощности при напряжении обмоток			Напряжения короткого замыкания в процентах номинального напря- жения			Вспомога- тельные обозначения к табл. 8 и 9
121 kV	38,5 kV	11 или 6,6 kV	ВН—СН	ВН—НН	СН—НН	
100	100	100	17	10,5	6	I
100	100	100	10,5	17	6	I
100	67	100	17	10,5	6	I
100	67	100	10,5	17	6	II
100	100	67	17	10,5	6	I
100	100	67	10,5	17	6	II
100	67	67	17	10,5	6	III
100	67	67	10,5	17	6	III

§ 23. Допуски. Для значений потерь (холостого хода и короткого замыкания) двухобмоточных и трехобмоточных трансформаторов устанавливается допуск $\pm 10\%$, за исключением потерь холостого хода трехфазных трансформаторов мощностью в 5 и 10 kVA, для которых устанавливается допуск $\pm 20\%$.

Для значений напряжения короткого замыкания и изменения напряжения устанавливается допуск $\pm 10\%$.

Для значений тока холостого хода устанавливается допуск $\pm 20\%$.

V. Трансформаторы для собственных нужд станций и подстанций

§ 24. Трехфазные двухобмоточные трансформаторы, предназначенные специально для собственных нужд станций и подстанций, изготавливаются согласно табл. 11.

Таблица 11

Трансформаторы для собственных нужд станций и подстанций

Номинальная мощность kVA	Номинальное напряжение обмоток		Схема и группа соединений обмоток	Напряжение короткого замыкания в процентах номинального напряжения
	ВН kV	НН kV		
560	10,5	0,525	Y/Δ — 11	8
	10,5	0,400	Y/Y ₀ — 12	
	10,5	0,230	Y/Y ₀ — 12	
	6,3	0,525	Y/Δ — 11	
	6,3	0,400	Y/Y ₀ — 12	
	6,3	0,230	Y/Y ₀ — 12	
	3,15	0,525	Y/Δ — 11	
	3,15	0,400	Y/Y ₀ — 12	
	3,15	0,230	Y/Y ₀ — 12	
750 и 1000	10,5	0,525	Y/Δ — 11	8
	10,5	0,400	Y/Y ₀ — 12	
	6,3	0,525	Y/Δ — 11	
	6,3	0,400	Y/Y ₀ — 12	
	3,15	0,525	Y/Δ — 11	
	3,15	0,400	Y/Y ₀ — 12	
1800 и 2400	10,5	6,3	Y/Δ — 11	8
	10,5	3,15		
	6,3	3,15		
3200 и 4200	10,5	6,3	Y ₀ /Y — 12 и Y/Δ — 11	8
	10,5	3,15		
	6,3	3,15		
5600	15,75	6,3	Y ₀ /Y — 12 и Y ₀ /Δ — 11	8
	15,75	3,15		
	10,5	6,3		
	10,5	3,15		
	6,3	3,15		
7500 и 10000	15,75	6,3	Y ₀ /Y — 12 и Y ₀ /Δ — 11	10
	15,75	3,15		
	10,5	6,3		
	10,5	3,15		
	6,3	3,15		
7500 и 10000	110	6,3	Y/Δ — 11	10,5
	110	3,15		

Примечание 1. Обмотка ВН трансформаторов собственных нужд номинальной мощностью в 750, 1000, 1800 и 2400 kVA, по желанию заказчика, выполняется с выведенной на крышку нулевой точкой.

Примечание 2. Схемы и группы соединения обмоток трансформаторов номинальной мощностью в 3200, 4200, 5600, 7500 и 10000 kVA, при первичном напряжении не выше 15,75 kV, выполняются по указанию заказчика.

Примечание 3. Потери в трансформаторах собственных нужд могут отклоняться от значений, приведенных в таблице 6 для соответствующих мощностей, не более чем на 25%.

VI. Способы охлаждения трансформаторов

§ 25. Способы охлаждения трансформаторов, предусмотриваемых настоящим стандартом, и соответствующие условные обозначения приведены ниже:

Охлаждение	Тип трансформатора	Условное обозначение
Естественное	Масляный, с естественным охлаждением	М
Искусственное воздушное	Масляный, с искусственным воздушным охлаждением (с дутьем)	Д
Искусственное водяное	Масляный, с водяным охлаждением	В
	Масляный, с принудительной циркуляцией масла и водяным охлаждением	Ц

VII. Нагрев и нагрузочная способность трансформаторов

§ 26. Наблюдаемые температуры частей трансформатора при сколь угодно длительно поддерживаемых во время испытания потерях холостого хода и короткого замыкания, при температуре окружающего воздуха $+35^{\circ}$ или охлаждающей воды $+25^{\circ}$, не должны превышать следующих значений:

Название частей трансформатора	Наибольшая наблюдаемая температура		Метод измерения температуры	Примечание
	при охлаждении М или Д	при охлаждении В или Ц		
Обмотки	105°	95°	Метод сопротивления	Наблюдаемые при испытании температуры частей трансформаторов типа В или Ц приняты на 10° ниже, чем у трансформаторов типа М или Д, так как в эксплуатации условия охлаждения трансформаторов с водяным охлаждением неизбежно ухудшаются, и температура частей их возрастает
Сердечник (на поверхности)	110°	100°	Метод термометра	
Масло (в верхних слоях)	95°	85°	Метод термометра	

Однако в эксплуатации в часы наивысшей температуры окружающего воздуха $+35^{\circ}$ ($+5^{\circ}$ для воды) номинальная нагрузка трансформатора не должна быть обязательно снижена, хотя наблюдаемые температуры частей трансформатора будут при этом выше указанных в таблице.

§ 27. Условия длительной нагрузки:

а) При температуре окружающего воздуха $+35^{\circ}$ ($+5^{\circ}$ для воды) трансформатор не должен подвергаться длительной нагрузке, превышающей его номинальную мощность.

б) При температуре окружающей среды ниже $+35^{\circ}$ допускается следующее увеличение длительной нагрузки трансформаторов типа М или Д сверх их номинальной мощности (длительная перегрузка):

1. В местностях, где среднегодовая температура не превышает $+5^{\circ}$, длительная перегрузка допускается в следующих пределах:

Температура окружающего воздуха	Допустимая длительная перегрузка трансформатора в процентах номинальной мощности
$+30^{\circ}$	5
$+25^{\circ}$	10
$+20^{\circ}$	15
$+15^{\circ}$	20
$+10^{\circ}$	25
$+5^{\circ}$	30
0°	35
-5°	40

2. В местностях, где среднегодовая температура колеблется в пределах от $+5$ до $+10^\circ$, длительная перегрузка допускается по вышеприведенной таблице, начиная с температуры окружающего воздуха $+25^\circ$. При этом перегрузка свыше 30% не допускается.

3. В местностях, где среднегодовая температура выше $+10^\circ$, длительная перегрузка допускается в следующих пределах:

Температура окружающего воздуха	Допустимая длительная перегрузка трансформатора в процентах номинальной мощности
$+10^\circ$	5
$+5^\circ$	10
0°	15
-5°	20

в) При температуре окружающего воздуха выше $+35^\circ$ длительная нагрузка трансформатора должна быть снижена на 2% от номинальной мощности на каждый градус повышения температуры сверх $+35^\circ$, вплоть до температуры $+60^\circ$, каковая является предельно-допустимой для охватываемых настоящим стандартом трансформаторов.

г) У трансформаторов с искусственным воздушным охлаждением при выключенном дутье номинальная мощность снижается на 30% .

Примечание. Нагрузка — как длительная, так и кратковременная — трансформаторов типа В или Ц, при отличной от $+25^\circ$ температуре охлаждающей воды, согласовывается особо.

28. Условия кратковременной нагрузки. При температуре окружающего воздуха, не превышающей $+35^\circ$, трансформаторы типа М или Д, вслед за длительной неполной нагрузкой (недогрузкой), допускают кратковременные нагрузки свыше номинальной мощности (перегрузки).

а) При температуре окружающего воздуха $+35^\circ$ вслед за неполной длительной нагрузкой трансформатора допускается кратковременная перегрузка его (P_{35}), величина (в процентах номинальной мощности) и продолжительность которой определяется нижеприведенными кривыми 1—6.

Примечание 1. При предшествующей переменной нагрузке процент допускаемой перегрузки определяется по кривой, соответствующей средней нагрузке трансформатора за предшествующие 12 часов или за последний предшествующий час, если средняя нагрузка за этот час превышает среднюю нагрузку за предшествующие 12 часов.

Примечание 2. Если масляный трансформатор с искусственным воздушным охлаждением в период, предшествующий перегрузке, работал без дутья, то при определении допустимой перегрузки следует исходить из значений предшествующей нагрузки, увеличенной в 1,5 раза.

б) При температуре (t) окружающего воздуха ниже $+35^\circ$ вслед за неполной длительной нагрузкой трансформатора допускается кратковременная перегрузка (P_t), определяемая (в процентах номинальной мощности) по формуле:

$$P_t = 35 - t + P_{35} \frac{135 - t}{100}.$$

При этом P_t не должно превышать $(30 + 1,3 P_{35})\%$.

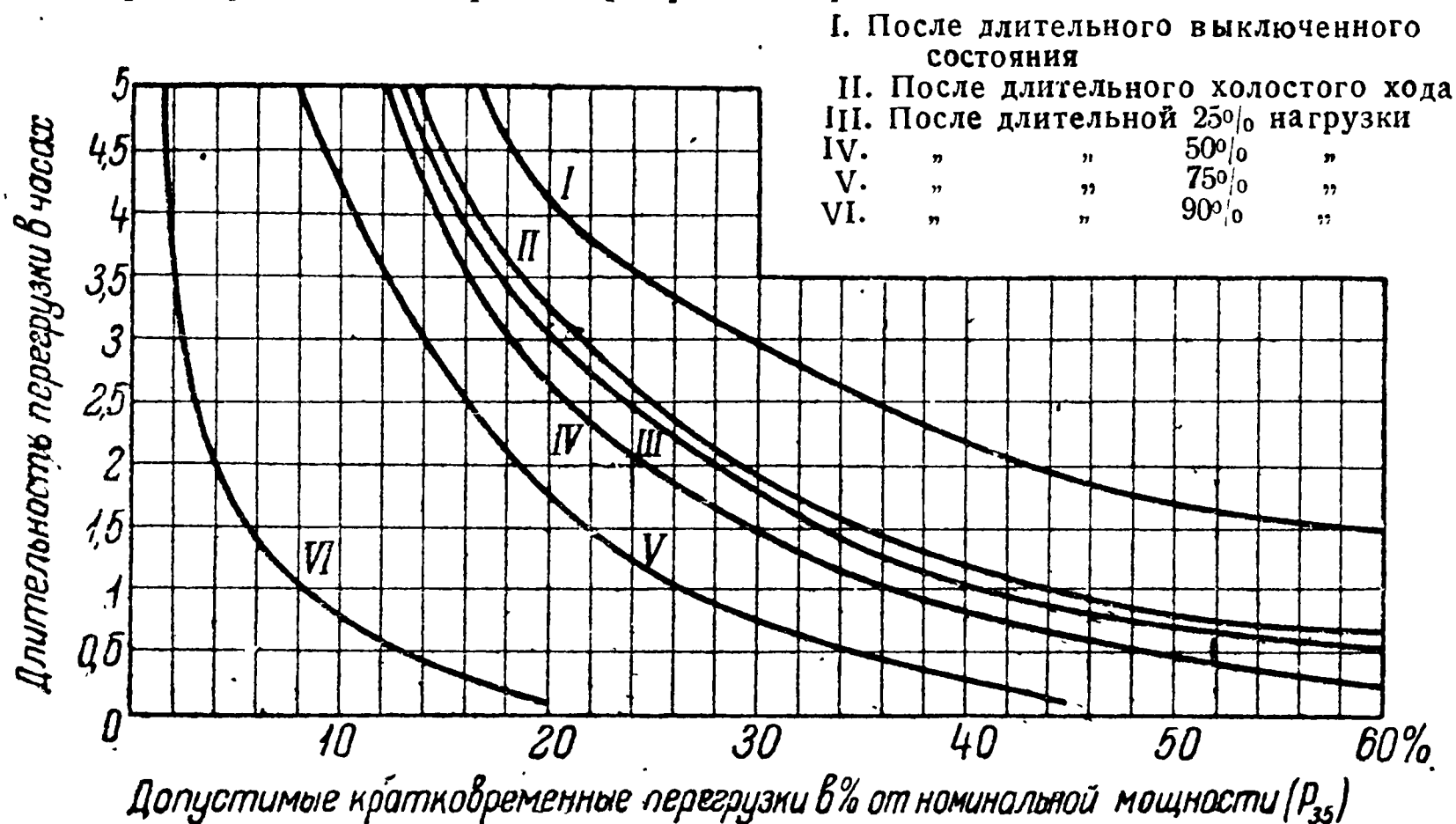
в) В аварийных случаях (при выходе из строя трансформатора или линии) допускаются, всего не более двух раз в год, кратковременные перегрузки в размере:

60%	номинальной мощности в течение	1 часа
100%	"	10 минут
130%	"	5 "

Кривые перегрузок (P_{35}) при окружающей температуре $+35^\circ$, допустимых вслед за неполной длительной нагрузкой трансформатора.

Двухобмоточные трансформаторы с естественным охлаждением и номинальным напряжением обмотки ВН до 35 kV.

Трехфазные трансформаторы от 5 до 75 kVA.

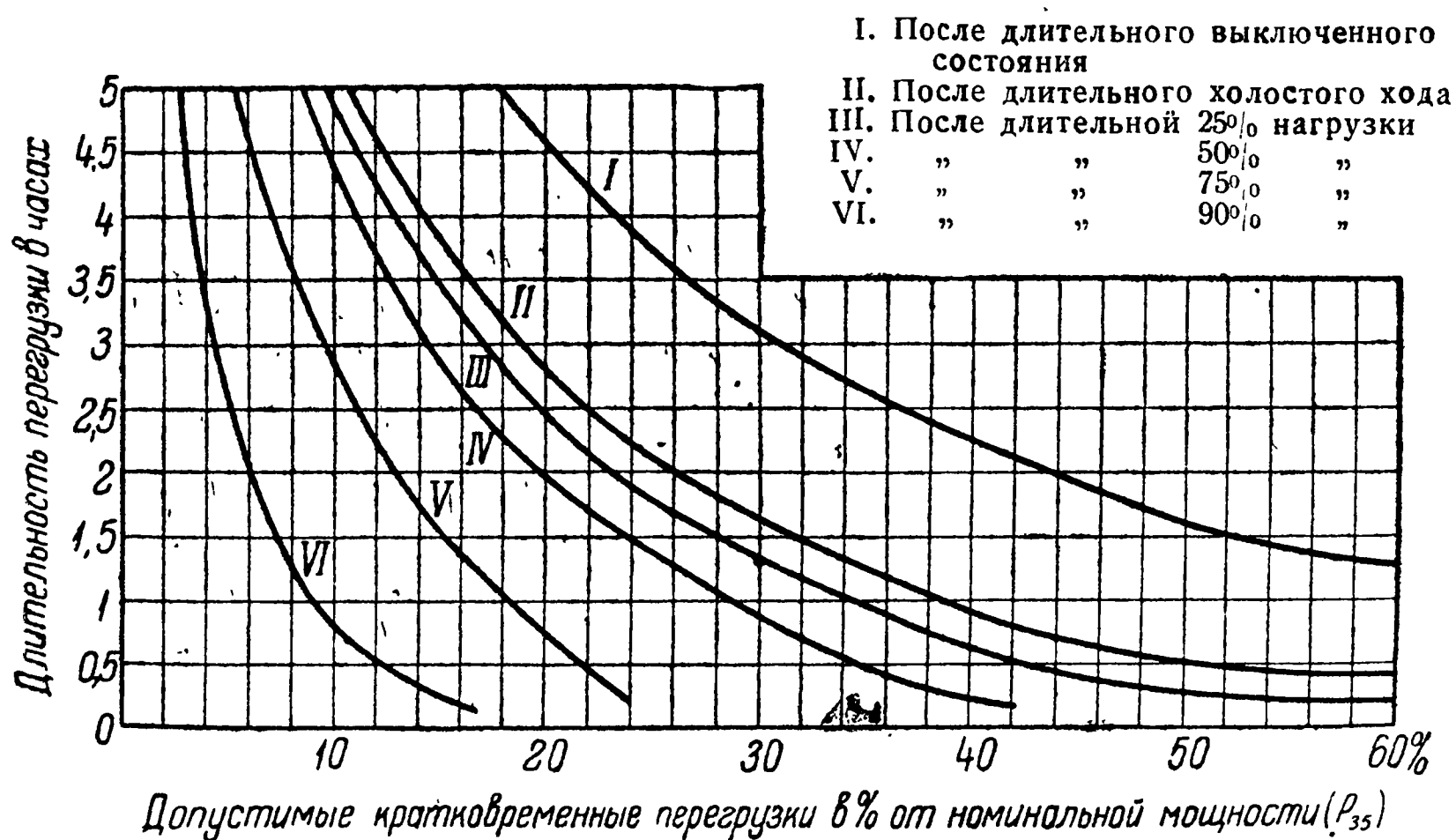


Черт. 1

Кривые перегрузок (P_{35}) при окружающей температуре $+35^\circ$, допустимых вслед за неполной длительной нагрузкой трансформатора.

Двухобмоточные трансформаторы с естественным охлаждением и номинальным напряжением обмотки ВН до 35 kV.

Трехфазные трансформаторы от 100 до 1800 kVA.

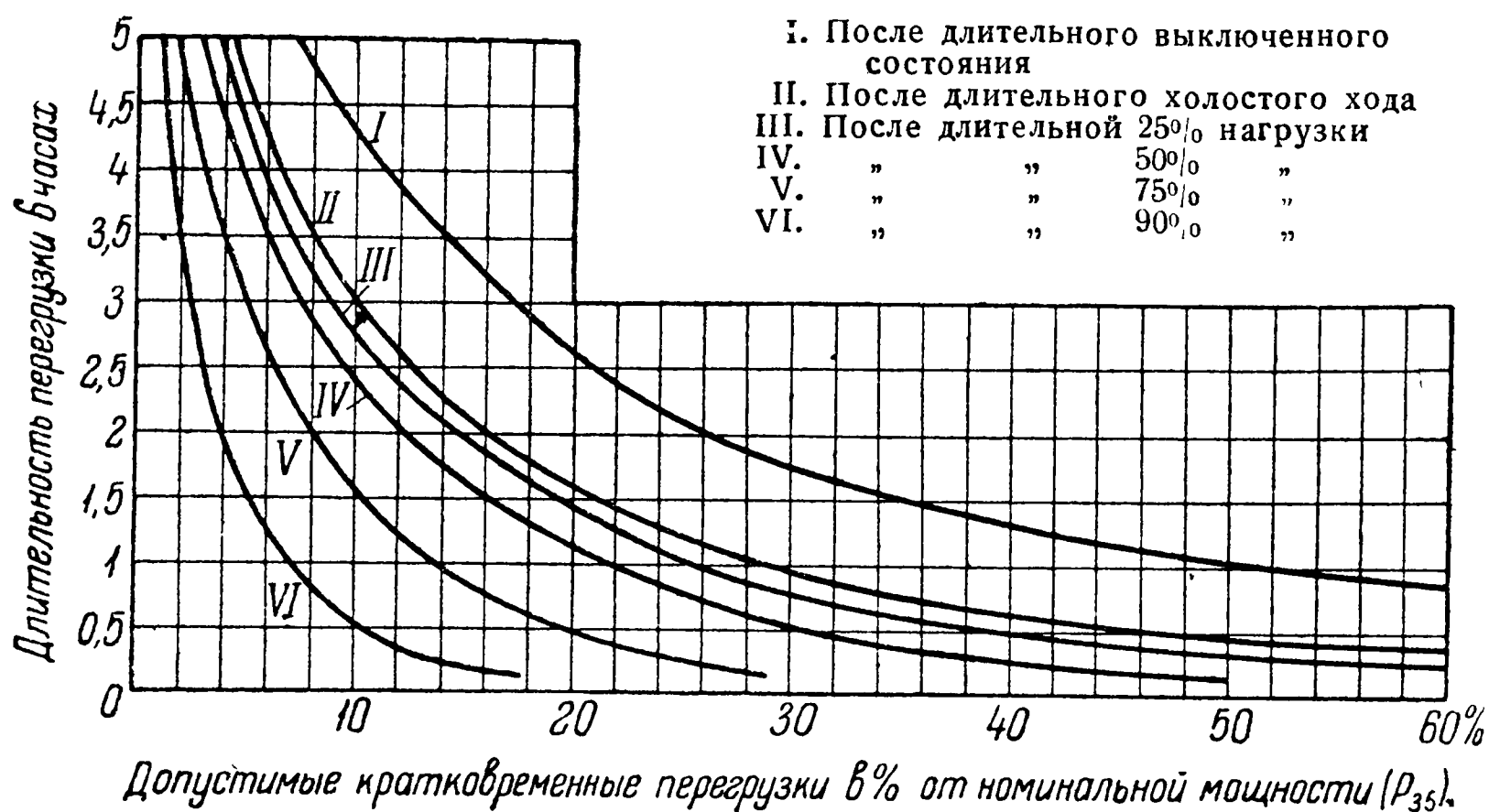


Черт. 2

Кривые перегрузок (P_{35}) при окружающей температуре $+35^\circ$, допустимых вслед за неполной длительной нагрузкой трансформатора.

Двухобмоточные трансформаторы с естественным охлаждением и номинальным напряжением обмотки ВН до 35 kV.

Трехфазные трансформаторы от 2400 до 7500 kVA.



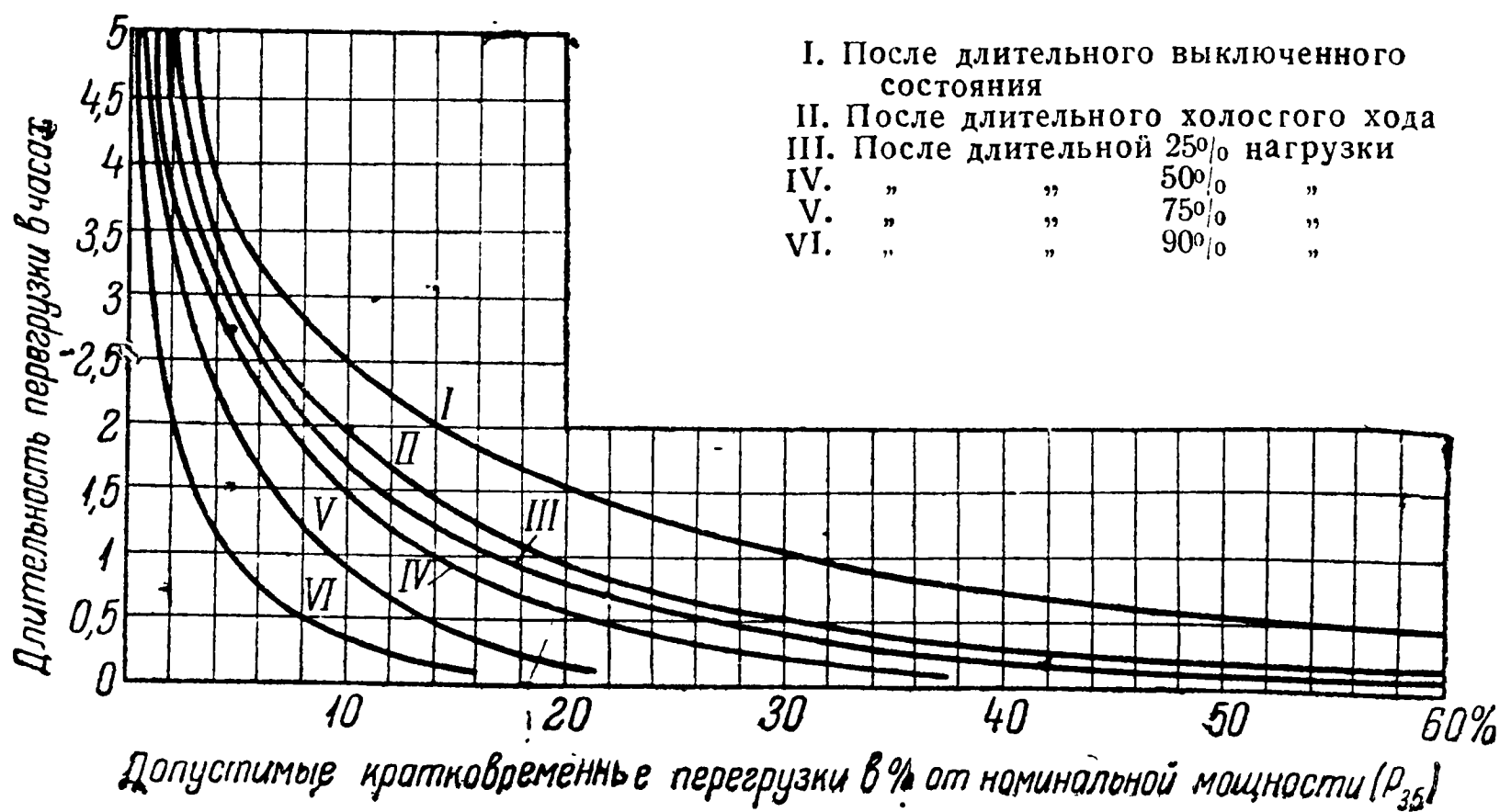
Черт. 3

Кривые перегрузок (P_{35}) при окружающей температуре $+35^\circ$, допустимых вслед за неполной длительной нагрузкой трансформатора.

Двухобмоточные трансформаторы с искусственным воздушным охлаждением и с номинальным напряжением обмотки ВН до 35 kV (см. примечание 2, § 28).

Трехфазные трансформаторы от 10000 до 31500 kVA.

Однофазные трансформаторы в 10500 kVA.



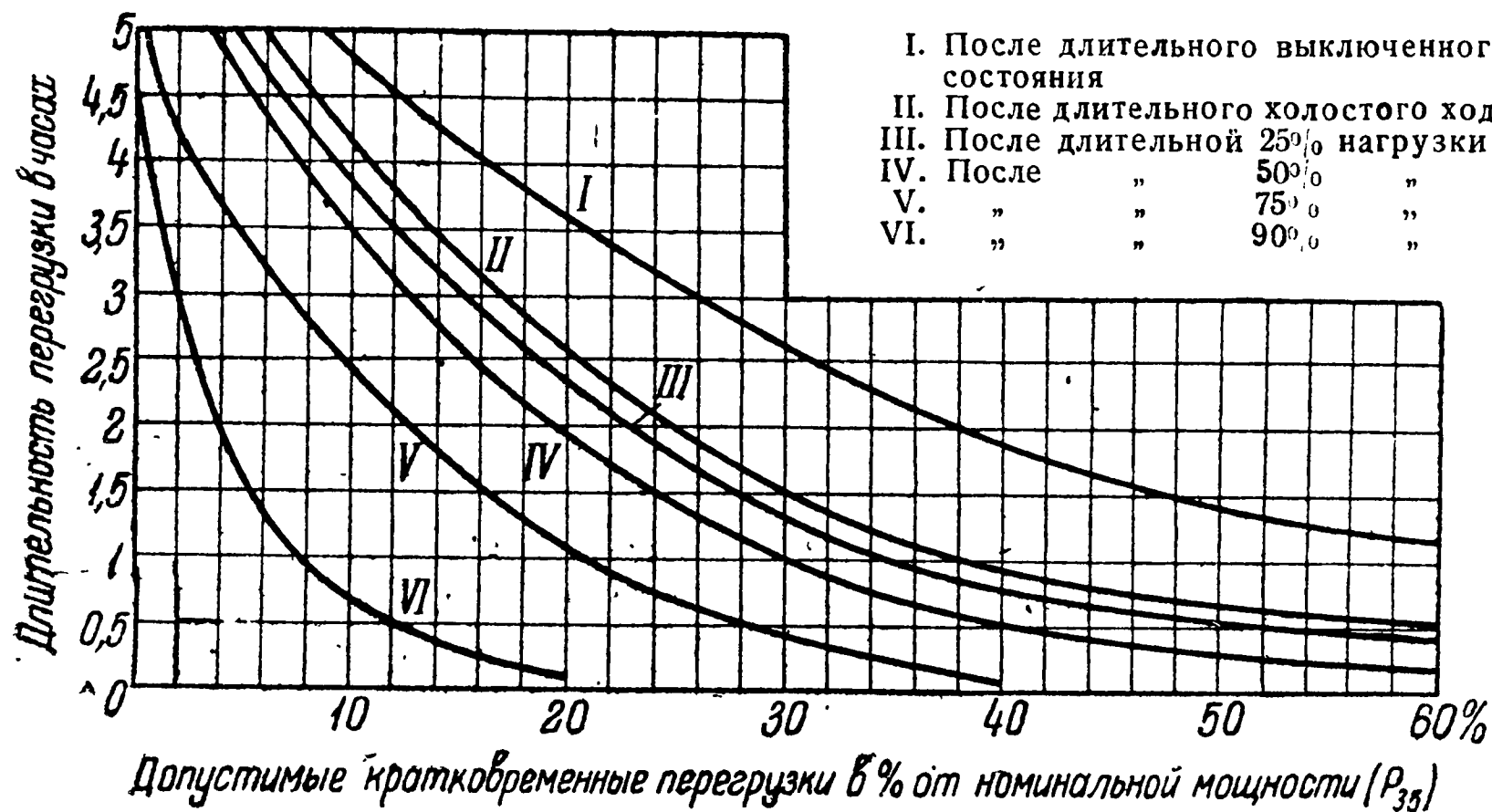
Черт. 4

Кривые перегрузок (P_{35}) при окружающей температуре $+35^\circ$, допустимых вслед за неполной длительной нагрузкой трансформатора.

Двух-и трехобмоточные трансформаторы с естественным охлаждением и номинальным напряжением обмотки ВН 110 kV.

Трехфазные трансформаторы от 3200 до 7500 kVA.

Однофазные трансформаторы от 3333 до 6667 kVA.



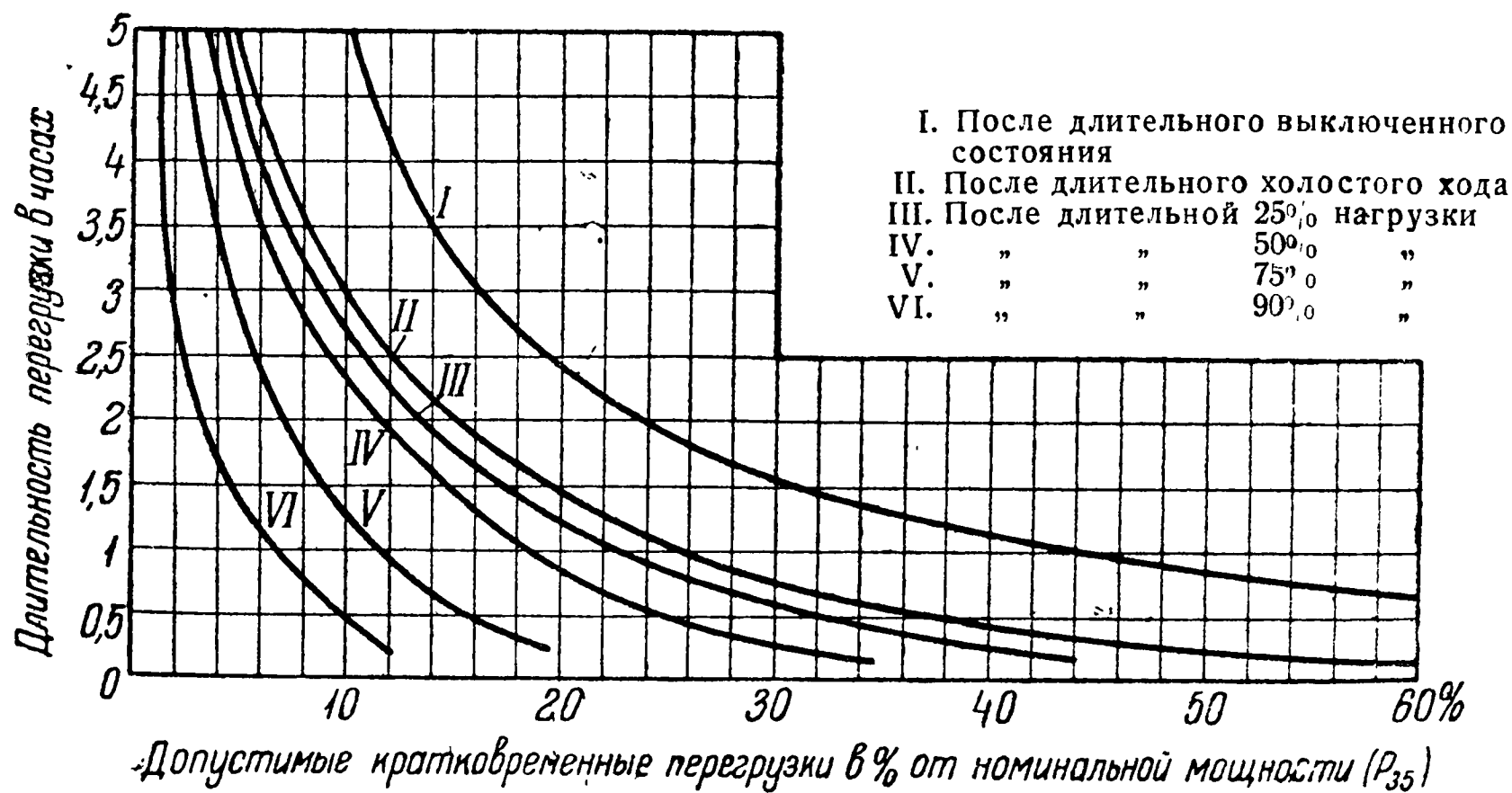
Черт. 5

Кривые перегрузок (P_{35}) при окружающей температуре $+35^\circ$, допустимых вслед за неполной длительной нагрузкой трансформатора.

Двух- и трехобмоточные трансформаторы с искусственным воздушным охлаждением с номинальным напряжением обмотки ВН 110 kV (см. примечание 2, § 28).

Трехфазные трансформаторы от 10000 до 31500 kVA.

Однофазные трансформаторы от 10500 до 40000 kVA.



Черт. 6

VIII. Стойкость трансформаторов при внезапных коротких замыканиях

§ 29. Трансформаторы должны в нормальных условиях эксплуатации выдерживать без повреждений и остаточных деформаций внезапные короткие замыкания.

[IX. Условия для параллельной работы трансформаторов

§ 30. Под параллельной работой двухобмоточных трансформаторов понимается работа при параллельном соединении как первичных, так и вторичных обмоток.

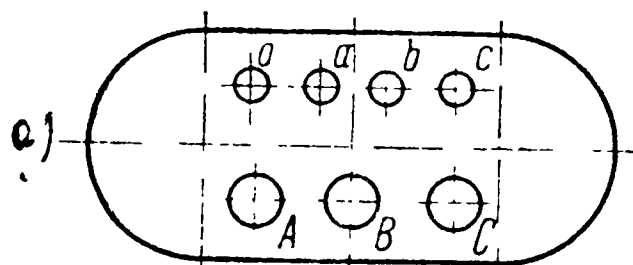
Параллельная работа с распределением нагрузки трансформаторов пропорционально их номинальной мощности возможна при условии равенства номинальных первичных и соответственно вторичных напряжений, равенства напряжений короткого замыкания и тождественности групп соединения обмоток. При этом рекомендуется, чтобы у параллельно соединенных трансформаторов отношение наибольшей мощности к наименьшей не превышало 3:1.

Примечание 1. Суммарная нагрузка параллельно включенных трансформаторов должна быть такова, чтобы ни один из трансформаторов не был нагружен выше его нагрузочной способности.

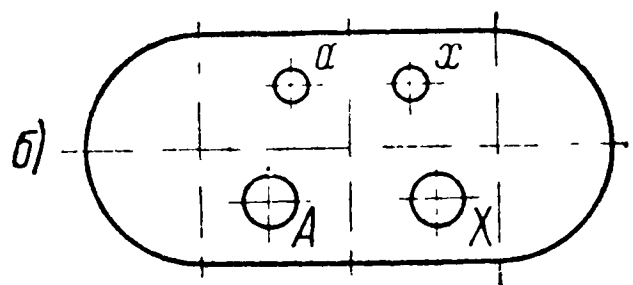
Примечание 2. При соблюдении указанных в настоящем параграфе условий допустима также параллельная работа трехобмоточных трансформаторов между собой и трехобмоточных трансформаторов с двухобмоточными. При этом распределение мощностей должно определяться каждый раз соответствующим предварительным расчетом.

X. Приспособления и арматуры**В ы в о д ы**

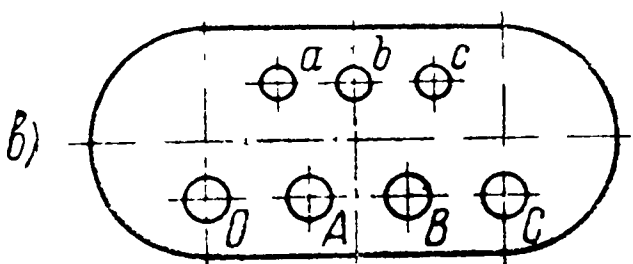
§ 31. Расположение выводов должно соответствовать схематическому эскизу (черт. 7).

Расположение выводов

Двухобмоточные трехфазные трансформаторы мощностью от 5 до 5600 kVA с высшим напряжением до 35 kV.



Двухобмоточные однофазные трансформаторы всех номинальных мощностей и напряжений.



Двухобмоточные трехфазные трансформаторы мощностью от 3200 kVA и более с высшим напряжением 110 kV и более, а также мощностью от 7500 kVA и более для всех напряжений.



Примечание 1. В трехобмоточных трансформаторах (черт. 7 „г“ и „д“) выводы НН могут быть расположены также в один фронт с выводами СН.

Примечание 2. Нулевой вывод ВН, по усмотрению завода, может быть расположен также и не по одному фронту с остальными выводами ВН.

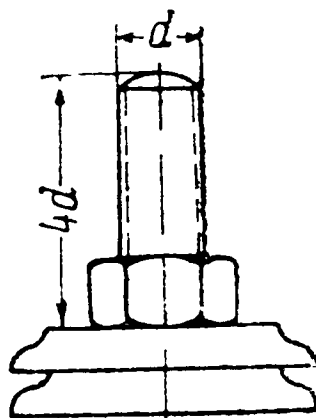
Примечание 3. В трансформаторах мощностью до 100 kVA напряжением до 6 kV выводы могут быть расположены также на боковых стенках бака.

Примечание 4. Для напряжений свыше 110 kV расположение выводов каждый раз согласовывается особо.

Примечание 5. Расположение выводов и расстояния между ними должны давать возможность удобного подвода ошиновки с соблюдением необходимых расстояний между токоведущими частями.

§ 32. Размеры и конструкция выводных стержней до 600 А должны соответствовать эскизу и табл. 12.

Таблица 12

Номиналь- ный ток	Стержни		Нарезка	Материалы		Эскиз
	Диаметр			стерж- ня	гайки	
	дюй- мы	мм				
До 50 А	1/2	12	Витворта или метри- ческая	Латунь	Латунь	
От 51 до 160 А	1/2	12	”	”	”	
” 161 ” 275 ”	1/2	12	”	Медь	”	
” 276 ” 400 ”	5/8	16	”	”	”	
” 401 ” 600 ”	3/4	20	”	”	”	

Примечание 1. Свободная длина стержней, включая длину, необходимую для гаек и контргаек, должна быть равна четырем диаметрам стержней, считая от поверхности головки изолятора.

Примечание 2. Концы стержней должны быть защищены от коррозии.

§ 33. При токах от 601 А и выше конструкция выводов должна обеспечивать возможность присоединения плоской шины.

Примечание 1. Конструкция выводов усганаавливается внутризаводским стандартом.

Примечание 2. При выполнении выводных изоляторов, допускающем смену их без съема крышки и подъема выемной части трансформатора, выводы выполняются круглыми стержнями.

§ 34. Выводы должны допускать возможность легкого демонтажа и смены. Демонтаж выводов трансформаторов однофазных, начиная с 3333 kVA, и трехфазных, начиная с 7500 kVA, производится без съема крышки.

§ 35. Переключение для регулирования напряжения. Переключение должно осуществляться при выключенном трансформаторе специальным механизмом с выведенной на крышку бака ручкой для управления.

Трансформаторы трехфазные мощностью в 7500 kVA и выше и однофазные в 3333 kVA и выше могут, по особому соглашению, снабжаться боковым приводом к переключателю для управления с земли.

Для трансформаторов мощностью выше 100 kVA с напряжением обмотки ВН до 6 kV, а также при напряжении выше 6 kV при токах от 551 А и выше допускается устройство основного вывода и ответвлений в отдельных изоляторах или в специальных изоляторах с тремя проходными стержнями, изолированными друг от друга.

Переключение внутри масляного бака допускается лишь в случаях, предусмотренных § 19.

Все детали переключателя и привода к нему должны быть сконструированы так, чтобы исключить неправильную сборку, ошибочное переключение и т. п.

§ 36. Консерватор. Трансформаторы мощностью до 100 kVA и с номинальным напряжением обмотки ВН до 6 kV изготавливаются без консерватора и должны иметь на крышке специальную пробку, обеспечивающую беспрепятственный вход и выход воздуха в бак при изменении температуры и объема масла, вследствие изменения нагрузки трансформатора и температуры окружающей среды.

Трансформаторы мощностью более 100 kVA или с ВН более 6,6 kV обязательно снабжаются консерватором.

Емкость консерватора должна быть рассчитана таким образом, чтобы при отключенном трансформаторе и при всех допускаемых режимах работы при колебаниях температуры окружающего воздуха в пределах от -35° до $+35^{\circ}$ уровень масла оставался в пределах корпуса консерватора.

В трансформаторах, снабженных газовым реле или другой аналогичной защитой, расположение консерватора должно обеспечивать удобный доступ к реле для его обслуживания и наблюдения.

Консерватор должен снабжаться специальной пробкой, обеспечивающей беспрепятственный вход и выход воздуха в консерватор при изменении объема содержащегося в нем масла, а также пробкой для заливки свежего масла диаметром не менее 30 mm и пробкой для спуска масла.

На консерваторе или, в случае его отсутствия, на баке трансформатора должны быть три четкие контрольные черты, соответствующие уровню масла при его температуре:

$$-35^{\circ}, +15^{\circ} \text{ и } +35^{\circ}.$$

Консерватор нормально располагается вдоль узкой стороны трансформатора, т. е. перпендикулярно линии изоляторов. Всякое другое расположение консерватора согласовывается особо.

Труба, служащая для сообщения бака с консерватором трансформатора, должна быть без U-образного изгиба или колена, иметь небольшой уклон и допускать возможность монтажа газового реле.

Труба, соединяющая масляный бак с консерватором, должна заканчиваться в консерваторе несколько выше его дна.

Трансформаторы однофазные мощностью 3333 kVA и выше и трехфазные мощностью 7500 kVA и выше снабжаются на крышке, в местах возможного скопления воздуха, краниками или специальными пробками.

§ 37. Все трансформаторы должны снабжаться маслоуказательными стеклами для определения уровня масла. В трансформаторах мощностью от 560 kVA и выше маслоуказательные стекла должны иметь приспособления, позволяющие сменить стекло без утечки и спуска масла из консерватора.

§ 38. Приспособления для спуска, отбора пробы, очистки, сушки и заливки масла.

а) Трансформаторы мощностью до 100 kVA должны иметь:

1) Пробку диаметром 30 mm на крышке бака.

Для заливки масла.

2) Спускную пробку внизу бака.

Для спуска и удобного отбора масла.

Конструкция пробки должна допускать возможность регулирования струи масла.

б) Трансформаторы мощностью 135—420 kVA должны иметь:

1) Кран с фланцем диаметром в 2" на крышке бака.

Для присоединения маслоочистительного аппарата и для заливки масла.

2) Кран с фланцем диаметром в 2" внизу бака.

Для присоединения маслоочистительного аппарата, для отбора пробы и спуска масла.

3) Пробку в днище бака.

Для спуска грязи и остатка масла.

в) Трансформаторы мощностью 560 kVA и выше должны иметь:

1) Запорный вентиль на трубке, соединяющей консерватор с баком.

Для отсоединения консерватора

2) Патрубок с фланцем диаметром в 1" и заглушкой на крышке бака.

Для присоединения вакуумного насоса.

3) Кран с фланцем диаметром в 2" на крышке бака.

Для присоединения маслоочистительного аппарата и для заливки масла.

4) Кран с фланцем диаметром 2" внизу бака.

Для присоединения маслоочистительного аппарата, для отбора пробы и спуска масла.

5) Пробку в днище бака.

Для спуска грязи и остатка масла.

г) Трансформаторы мощностью от 1800 kVA и выше, вместо указанного в п. 4 „в“ двухдюймового крана, имеют кран диаметром в зависимости от мощности трансформатора, но не менее 3".

д) В трансформаторах, имеющих бак с радиаторами, каждый радиатор снабжается двумя вентилями, позволяющими отключать радиатор без слива масла из бака, и двумя пробками: одной в нижней части для спуска масла и другой в верхней части — для впуска воздуха при сливе масла.

е) Все масляные краны, вентили и пробки должны иметь приспособления для пломбирования.

Примечание 1. Все краны, вентили и пробки, в особенности служащие для взятия пробы масла и спуска его из бака, должны располагаться на видном и удобном для управления месте.

Примечание 2. Все краны должны быть снабжены метками, указывающими положение крана.

§ 39. Катк и. Трансформаторы мощностью до 75 kVA выполняются без катков. Расстояние от пола до волны бака или до охлаждающей трубы должно быть не менее 85 mm.

Трансформаторы от 100 до 1000 kVA выполняются с переставными катками для передвижения трансформаторов как широкой, так и узкой стороной вперед.

Трансформаторы мощностью выше 1000 kVA выполняются с катками для передвижения трансформатора широкой стороной вперед. По желанию заказчика, допускается расположение катков для передвижения трансформатора узкой стороной вперед.

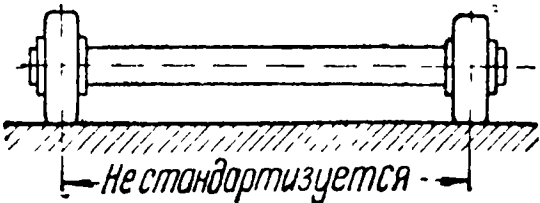
Катки нормально выполняются гладкими без реборд; однако, по желанию заказчика, для трансформаторов трехфазных, начиная с 3200 kVA, и однофазных, начиная с 3333 kVA, допускается изготовление катков с ребордами.

П р и м е ч а н и е. Катки трансформатора предназначены для передвижения последнего с платформы на фундамент трансформатора, а также для передвижения трансформатора на небольшие расстояния в пределах п/станций. Транспорт трансформатора по железной дороге на собственных катках не допускается.

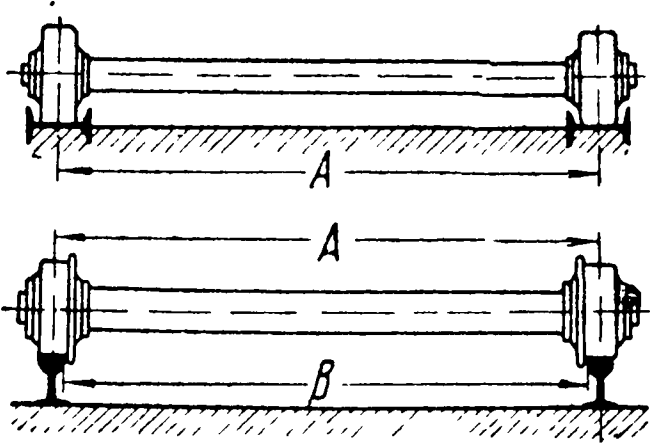
§ 40. Расстояние между катками дано на черт. 8.

Ширина колеи и расстояние между средними линиями катков

1. Для трансформаторов весом до 2,5 t (до 320 kVA).



2. Для трансформаторов весом выше 2,5 t.



Черт. 8

Расстояние между средними линиями катков	A	820	1070	1594	2070	3070
Ширина колеи	B	750	1000	1524	2000	3000

1. Размеры ширины колеи обязательны для изделий весом выше 2,5 t.
2. Размерами A и B предусмотрена взаимозаменяемость при посадке на ось катков гладких и с ребордами.

§ 41. Трансформаторы с принудительным воздушным охлаждением доставляются комплектно со смонтированным на основании электровентиляторным агрегатом. Данные для выбора электродвигателя (ток, напряжение и т. п.) устанавливаются заказчиком.

§ 42. З а з е м л е н и е. Трансформаторы должны снабжаться заземляющим болтом, диаметром 12 mm, расположенным в доступном месте на нижней раме и снабженным надписью „земля“.

Поверхность заземляющего контакта должна быть гладкой и зачищенной, причем ее размеры должны быть достаточными для получения надежного соединения с железной шиной 30×4 mm². Сердечник трансформатора должен иметь металлическое соединение с баком.

§ 43. П р и с п о с о б л е н и я для измерения температуры масла.

а) Трансформаторы мощностью до 240 kVA имеют в крышке бака отверстие с нарезкой для установки термометра с арматурой; последний доставляется комплектно с трансформатором и предназначается для измерения температуры верхних слоев масла.

По желанию заказчика, трансформаторы могут быть снабжены сигнальными термометрами.

б) Трансформаторы мощностью в 320 kVA и выше должны снабжаться манометрическими термометрами с круглым циферблатом с сигнальными контактами. Термометры укрепляются на стенке бака на высоте 1,5 m от уровня катания трансформатора.

в) Однофазные трансформаторы мощностью в 3333 kVA и выше и трехфазные мощностью в 7500 kVA и выше снабжаются комплектным устройством для дистанционного измерения температуры масла.

Трансформаторы меньшей мощности, начиная от 1800 kVA и выше, должны допускать возможность установки дистанционного термометра; последний, по желанию заказчика, доставляется с трансформатором.

г) Трансформаторы мощностью в 3200 kVA и выше, начиная с 1/I 1938 г., должны снабжаться аппаратурой для дистанционного измерения температуры обмоток.

§ 44. З а щ и т н ы е у с т р о й с т в а. Трансформаторы мощностью в 1000 kVA и выше, а по особому требованию заказчика и трансформаторы мощностью от 560 kVA и выше должны снабжаться газовым реле.

§ 45. Трансформаторы с низшим номинальным линейным напряжением до 400 V снабжаются пробивным предохранителем, который при соединении обмоток в звезду включается между нулем обмотки и землей, а при соединении в треугольник — между одной из фаз и землей.

§ 46. Пробивной предохранитель должен быть рассчитан на ток заземления в 200 A в течение 30 минут.

Трансформаторы мощностью в 1000 kVA и выше снабжаются выхлопной трубой с мембраной для быстрого удаления газов, могущих возникнуть в результате внутреннего повреждения трансформатора.

§ 47. П о д ъ е м н ы е п р и с п о с о б л е н и я.

а) Подъем трансформаторов производится за верхнюю раму масляного бака, за кольца и крюки, в зависимости от мощности трансформатора. Во всех этих случаях допускается подъем трансформаторов, залитых маслом.

б) Подъем выемной части трансформаторов мощностью до 100 kVA и напряжением до 6 kV производится по снятии крышки за прессующие ядро бруски.

Подъем выемной части других трансформаторов мощностью до 5600 kVA и напряжением до 35 kV производится вместе с крышкой с помощью двух или четырех (в зависимости от мощности) подъемных колец, устанавливаемых на крышке трансформатора.

Подъем выемной части всех остальных трансформаторов производится по снятии крышки за специальные ушки.

Нижняя рама бака трансформаторов мощностью от 7500 kVA и выше для трехфазных и от 5000 kVA и выше для однофазных снабжается скобами для подъема трансформатора домкратами.

в) Все трехфазные трансформаторы мощностью до 5600 kVA с напряжением до 35 kV допускают передвижение на катках по наклонной (от 10° до 15°) и горизонтальной плоскости.

Все прочие трансформаторы допускают передвижение на катках только по горизонтальной плоскости. По наклонной плоскости эти трансформаторы должны передвигаться с применением специальных приспособлений, препятствующих опрокидыванию трансформатора.

Для удобства передвижения все трансформаторы в 1000 kVA и выше снабжаются на нижней раме роликами или специальным приспособлением.

§ 48. Механическая прочность масляного бака. Масляные баки трансформаторов выполняются гладкими, трубчатыми, волнистыми или с радиаторами. В баках с радиаторами должно быть предусмотрено приспособление для придания жесткости радиаторам.

Масляные баки трансформаторов должны выдерживать без деформации короткие замыкания во внешней цепи.

Масляные баки волнистые и радиаторные должны выдерживать вакуум в 20 см и внутреннее давление в 0,2 атмосферы.

Масляные баки трубчатые, гладкие и радиаторные со снятыми радиаторами должны выдерживать вакуум в 35 см и внутреннее давление в 0,5 атмосферы.

XI. Гарантии

§ 49. Завод-изготовитель гарантирует, что конструкция, примененные материалы и качество выполнения обеспечивают длительную работу трансформатора без аварий, замены частей и без изменения характеристик его, при условии надлежащей эксплуатации согласно инструкции завода.

Срок номинальной гарантии работы трансформатора устанавливается по соглашению заказчика с заводом.

В. ИСПЫТАНИЯ

§ 50. Контрольные и типовые испытания. Испытания трансформаторов разделяются на:

- а) типовые и
- б) контрольные:
 - 1) на месте изготовления и
 - 2) (по желанию заказчика) на месте установки трансформатора.

Типовые испытания производятся над каждым вновь разработанным типом трансформатора и повторяются не реже одного раза в два года. Типовые испытания повторяются, полностью или частично, в случае внесения изменений в конструкцию, в материалы или технологические процессы изготовления трансформаторов.

Контрольные испытания производятся на заводе над каждым выпускаемым с завода трансформатором.

Контрольные испытания на месте установки над трансформаторами с напряжением обмотки ВН 110 kV и выше производятся по особому согласованию.

§ 51. В типовые испытания входят:

- 1) Определение коэффициента трансформации для основных выводов ответвлений.
- 2) Снятие характеристики холостого хода и определение потерь и токов холостого хода при номинальном напряжении и номинальной частоте.

- 3) Снятие характеристики короткого замыкания и определение потерь и напряжений короткого замыкания для номинальных условий работы.
- 4) Испытание на нагрев при длительной номинальной нагрузке, при перегрузках и при снижении нагрузки с частичным выключением охлаждения.
- 5) Измерение сопротивления обмоток постоянным током.
- 6) Измерение сопротивления изоляции обмоток по отношению к заземленным частям и между обмотками.
- 7) Испытание изоляции на электрическую прочность согласно ОСТ на методы испытания трансформаторов:
 - а) испытание изоляции между обмоткой и корпусом и между обмотками;
 - б) испытание междукатушечной и междувитковой изоляции.
- 8) Проверка схемы и группы соединения обмоток.
- 9) Испытание механической прочности масляного бака на вакуум и давление.
- 10) Испытание всех деталей, приспособлений и механизмов, входящих в комплектную поставку, с точки зрения правильности их выбора и функционирования в условиях эксплуатации.
- 11) Испытание на термическую и динамическую устойчивость при коротких замыканиях (каковые производятся при особых условиях, указанных в стандарте на методы испытания трансформаторов).

§ 52. В контрольные испытания на месте изготовления трансформатора входят:

- 1) Проверка коэффициента трансформации для основных выводов и ответвлений.
- 2) Измерение сопротивления обмоток постоянным током.
- 3) Опыт холостого хода при номинальных напряжениях и частоте.
- 4) Опыт короткого замыкания (при трехобмоточных трансформаторах опыт производится для каждой пары обмоток).
- 5) Измерение сопротивления изоляции обмоток по отношению к заземленным частям и между обмотками.
- 6) Испытание изоляции на электрическую прочность согласно ОСТ на методы испытания трансформаторов.
- 7) Проверка схемы и группы соединения обмоток.
- 8) Испытание механической прочности масляного бака на вакуум и давление.
- 9) Внешний осмотр трансформатора в целях установления тщательности изготовления.

§ 53. Контрольные испытания трансформаторов на месте их установки, выполняемые по желанию заказчика, производятся после окончательного их монтажа и обеспечиваются всеми необходимыми аппаратами, измерительными приборами и прочими приспособлениями средствами заказчика.

В контрольные испытания на месте установки входят:

- 1) Проверка на отсутствие обрыва обмоток.
- 2) Измерение сопротивления изоляции обмоток по отношению к заземленным частям и между обмотками.
- 3) Проверка коэффициента трансформации для основных выводов и ответвлений.
- 4) Проверка схемы и группы соединения обмоток.
- 5) Опыт холостого хода.
- 6) Опыт короткого замыкания.

- 7) Проверка правильности функционирования всех приборов и аппаратов, работающих совместно с трансформатором.
- 8) Испытание трансформатора на нагрев.
- 9) Испытание трансформатора на перегрузку.

§ 54. Испытательные напряжения. Величины испытательных напряжений для контрольного испытания на электрическую прочность изоляции между обмоткой и корпусом и между обмотками в течение 1 минуты даны в табл. 13.

Таблица 13

Испытательные напряжения

Номинальное эксплуатационное напряжение обмотки, V	До 525	3000	6000	10000	15000	35000	110000	154000	220000
Статическое испытательное напряжение обмотки, V	5000	18000	25000	35000	45000	85000	230000	320000	460000

§ 55. Приведенные в §§ 50, 51, 52 и 53 испытания устанавливаются временно, впредь до утверждения особого стандарта на методы испытания силовых трансформаторов.

Г. МАРКИРОВКА и УПАКОВКА

§ 56. Маркировка.

Каждый трансформатор снабжается табличкой из материала, противостоящего атмосферным влияниям. Табличка, прикрепленная на видном месте к баку (трансформатора), должна содержать нижеперечисленные данные, которые наносятся путем травления, гравировки, выбивания или другим способом, обеспечивающим видимость и долговечность знаков:

Завод

Обозначение типа

ОСТ № . . .

Фабричный номер

Год выпуска

Число фаз

Частота

Номинальная мощность в киловольтамперах (в трехобмоточных трансформаторах — мощность каждой обмотки)

Режим работы

Схема и группа соединения обмоток

Напряжения и токи для основного вывода и ответвлений обмоток, причем номинальные напряжения и токи подчеркиваются горизонтальной чертой

Напряжение короткого замыкания

Способ охлаждения

Полный вес трансформатора

Вес масла

Вес выемной части

Положения переключателя, обозначенные на его приводе.

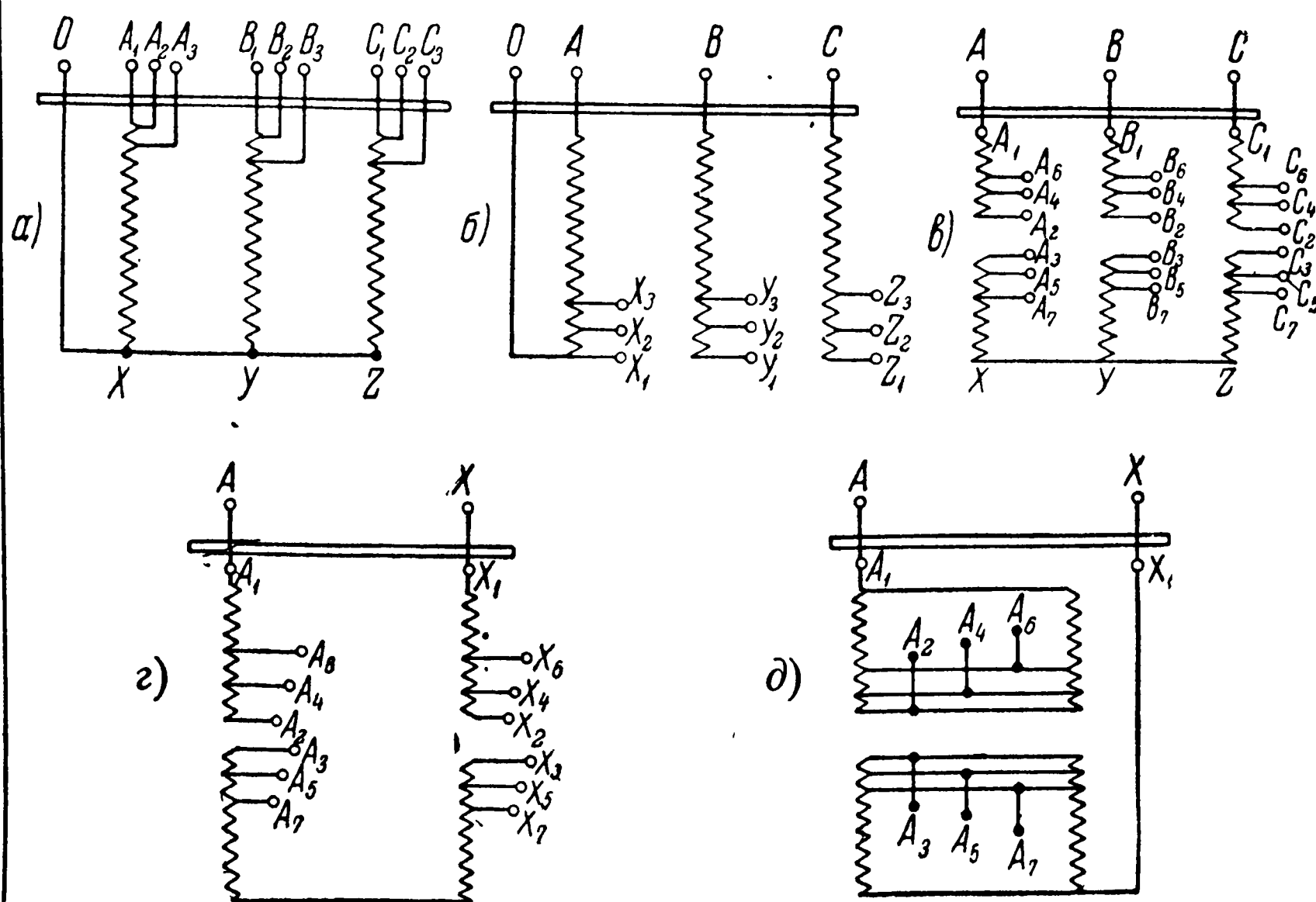
Примечание 1. В графе „Напряжение короткого замыкания“ про- ставляется величина, фактически измеренная для данного трансформатора.

Примечание 2. При искусственном воздушном охлаждении должна быть указана также мощность трансформатора при выключении искусственного охлаждения.

Примечание 3. Фабричный номер трансформатора выбивается на баке ниже таблички, на крышке около изолятора ВН фазы А и на левом конце верхней полки консоли сердечника.

§ 57. Обозначения начал, концов ответвлений и нейтрали обмоток трехфазных и однофазных трансформаторов указаны на черт. 9.

Обозначения ответвлений и нейтрали обмоток



Черт. 9

Примечание. Обозначения выводов должны быть нанесены нестирающейся красной краской, а также выбиты на крышке.

§ 58. Все надписи выполняются обязательно по трафарету крупным и отчетливым шрифтом и ставятся на видном месте.

§ 59. Все могущие подвергаться коррозии и порче поверхности трансформатора должны быть покрашены.

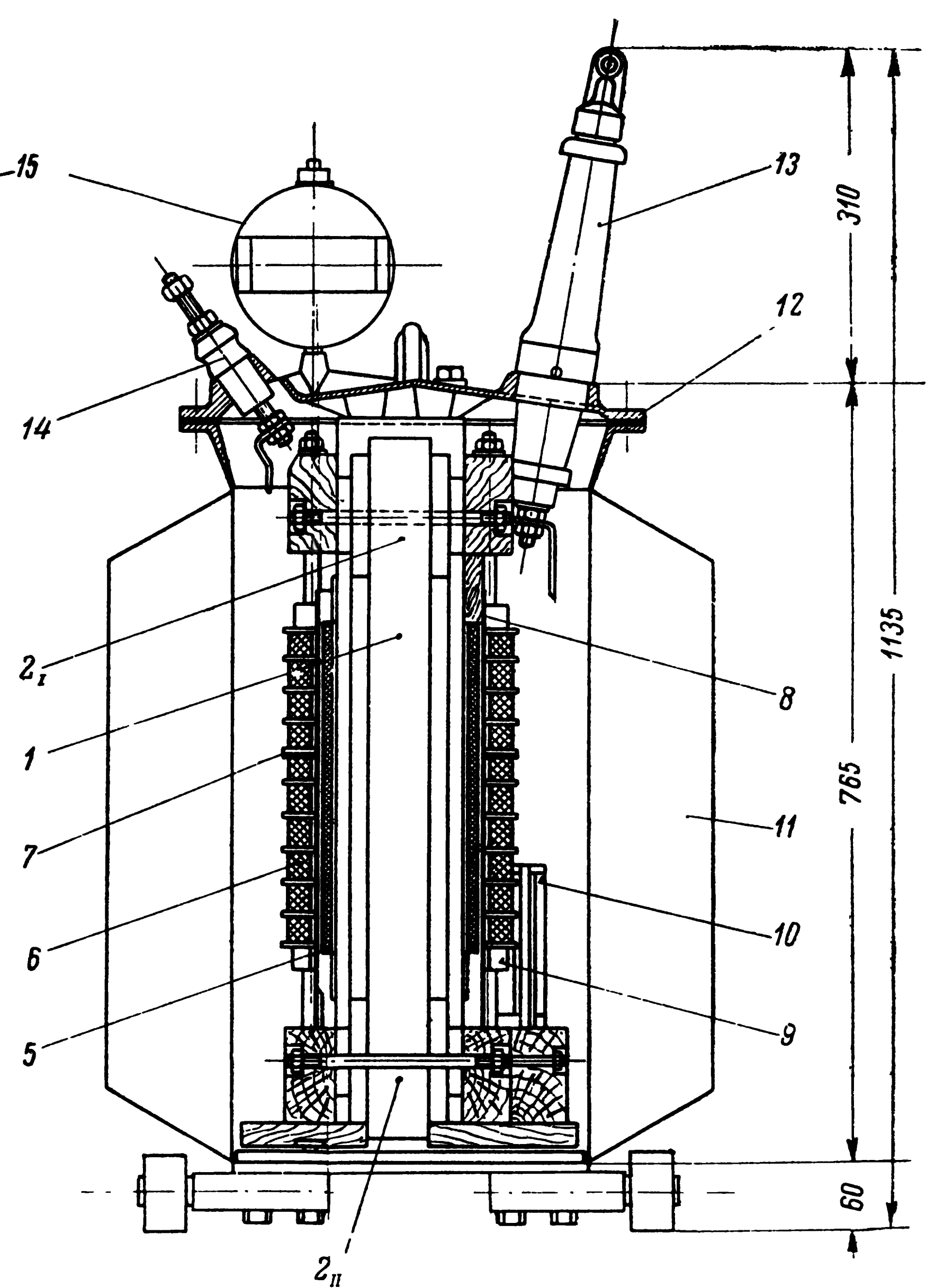
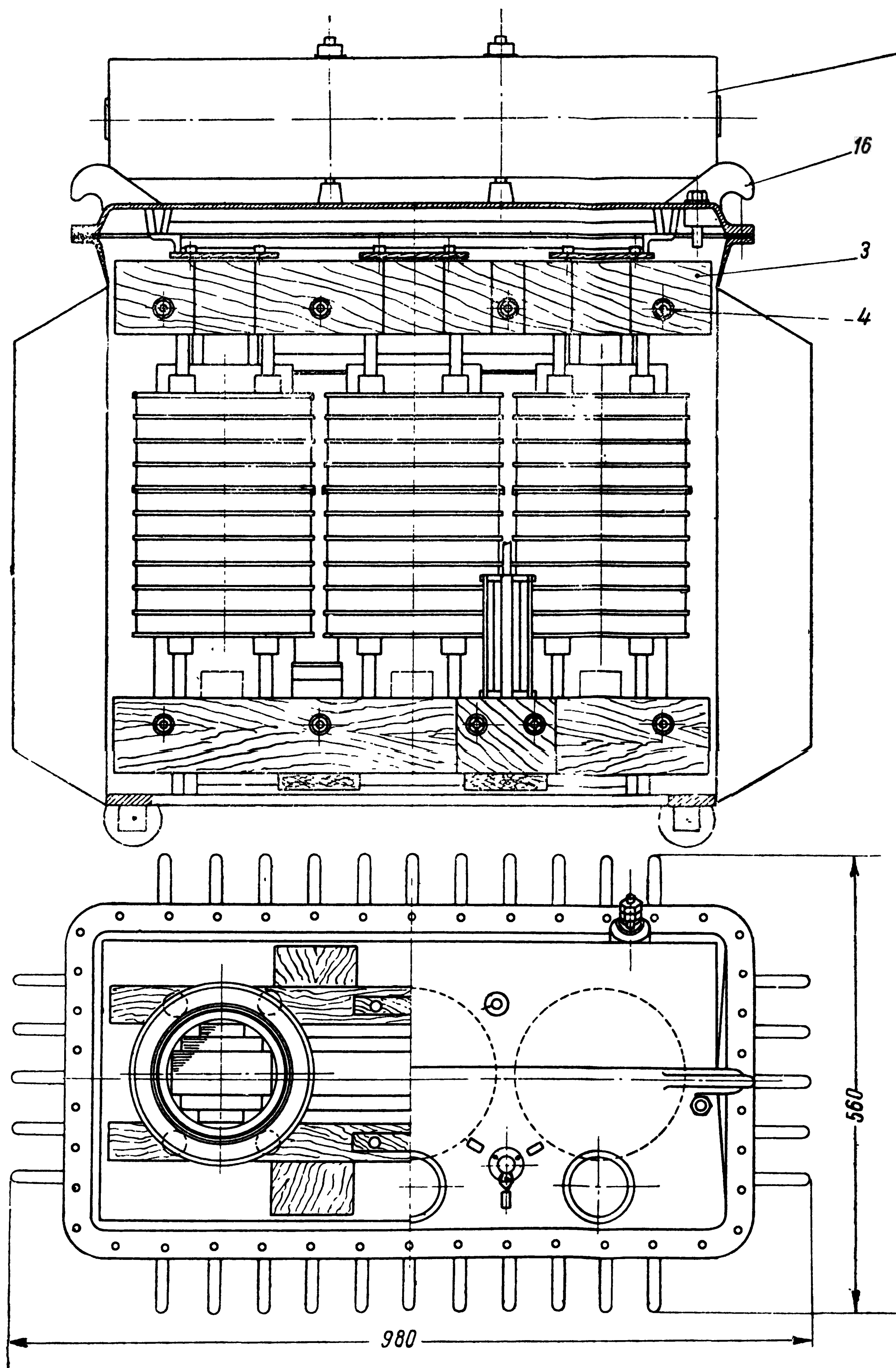
Применяемые краски должны отличаться особой прочностью и хорошо противостоять атмосферным и температурным воздействиям, не изменяя при этом своего первоначального цвета.

§ 60. Упаковка.

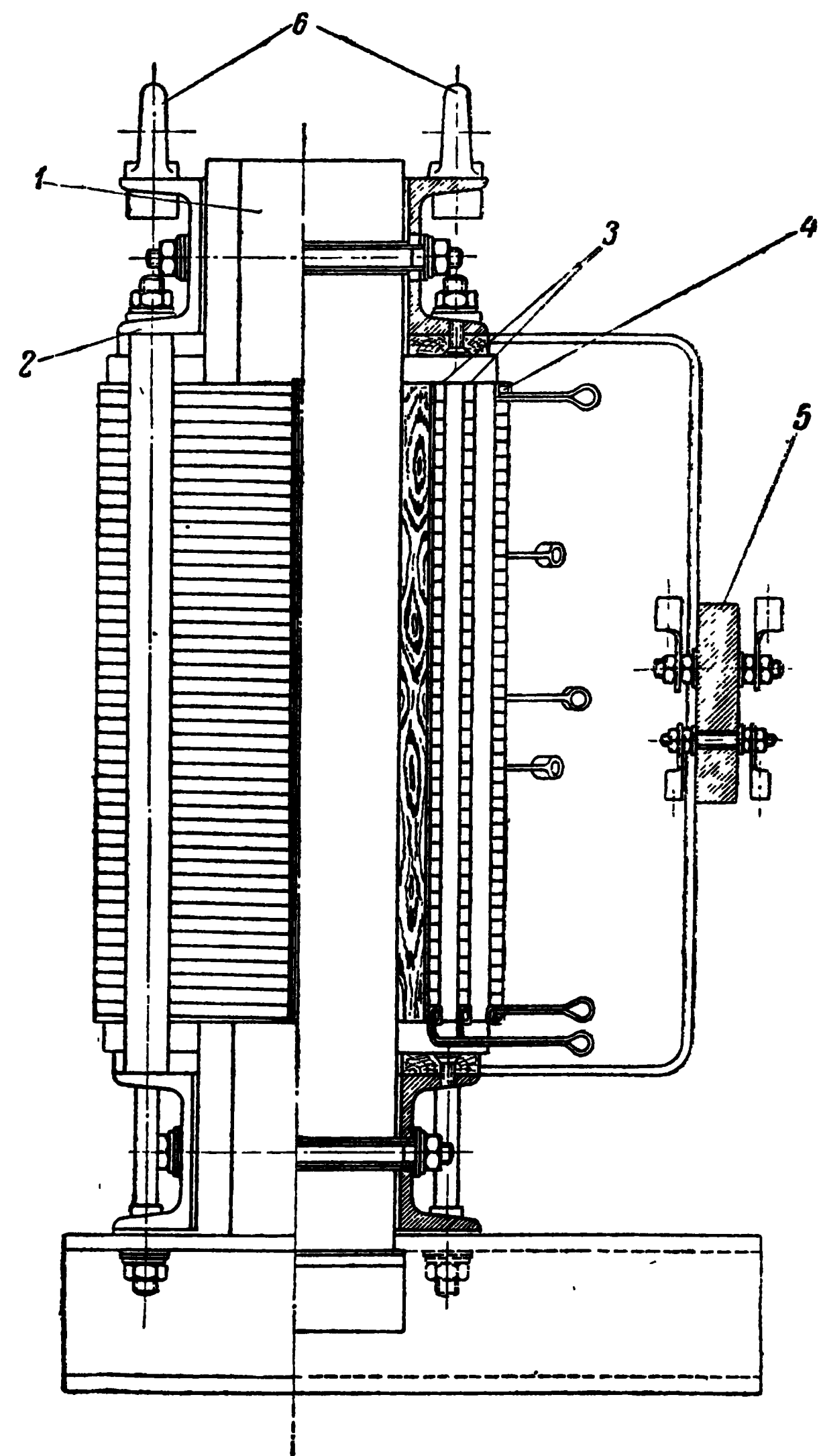
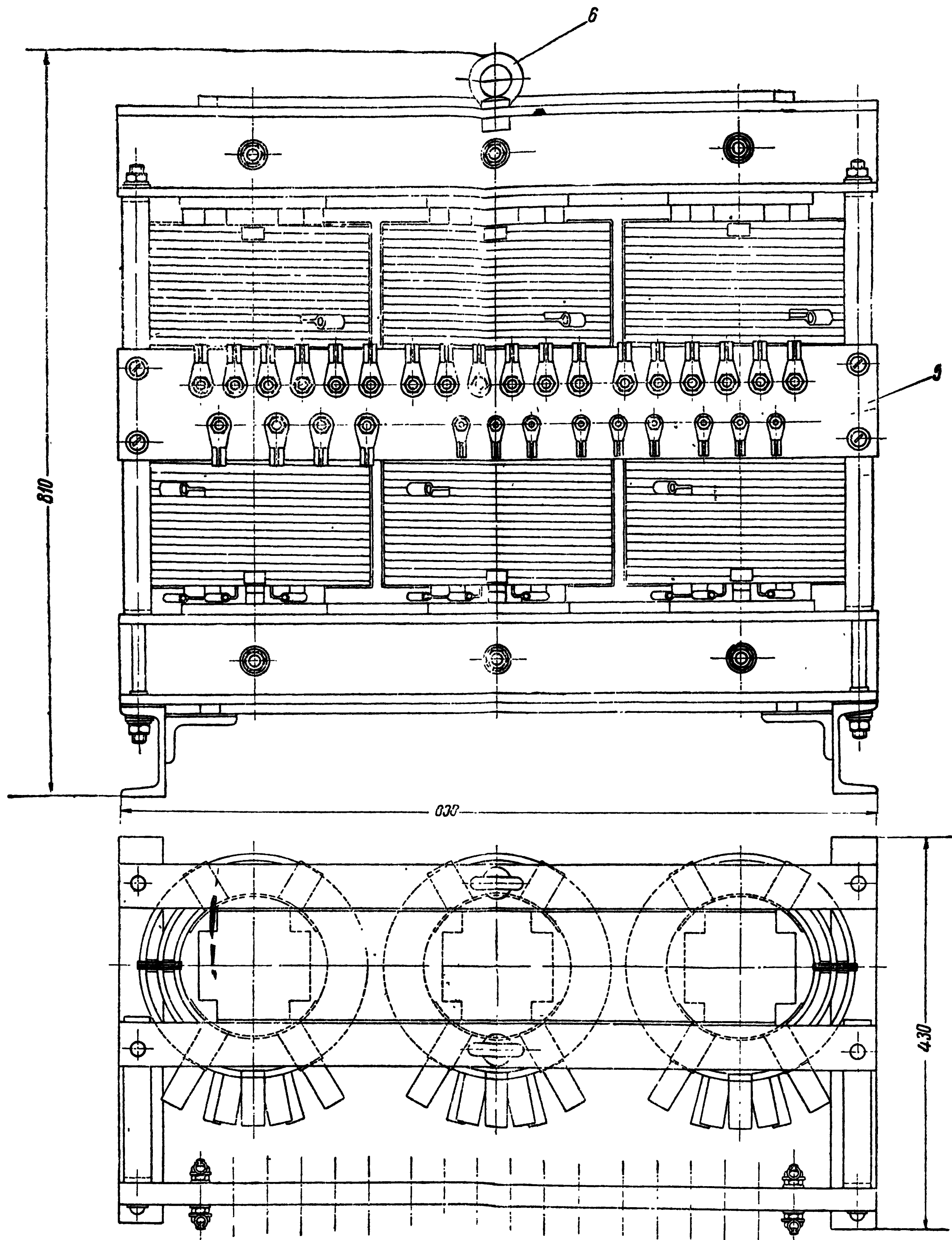
а) Трансформаторы доставляются заказчику залитые маслом и высушенные.

б) По соображениям механической прочности и железнодорожных габаритов при транспортировке допускается снятие отдельных частей трансформатора, при условии доставки самого трансформатора залитым маслом или заполненным инертным газом.

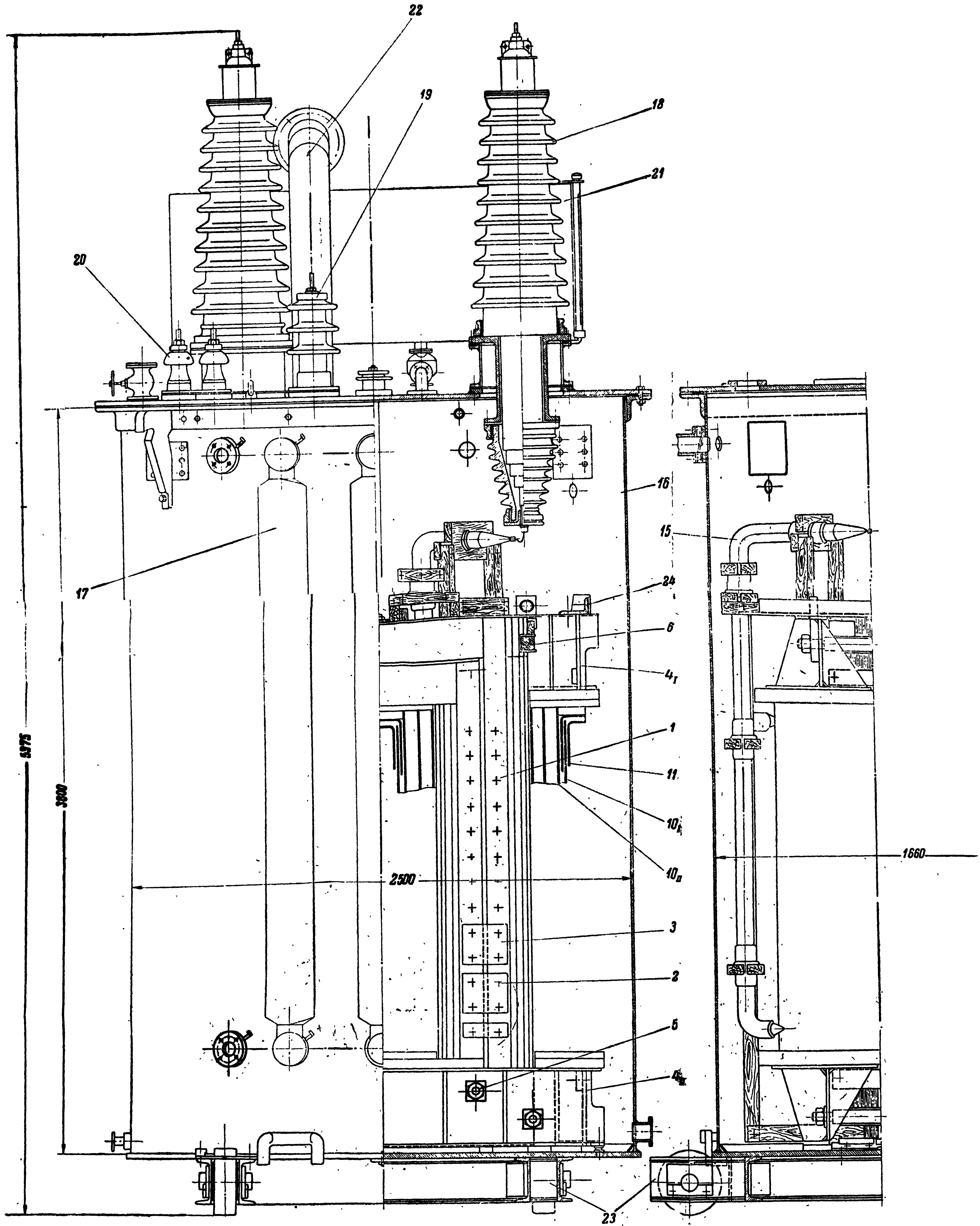
в) Упаковка трансформаторов должна быть тщательной, обеспечивающей доставку частей трансформатора на место без повреждений.



Чертеж I. Общий вид трехфазного трансформатора 50 kVA, 10 000/400 V, *50 Hz с естественным масляным охлаждением.

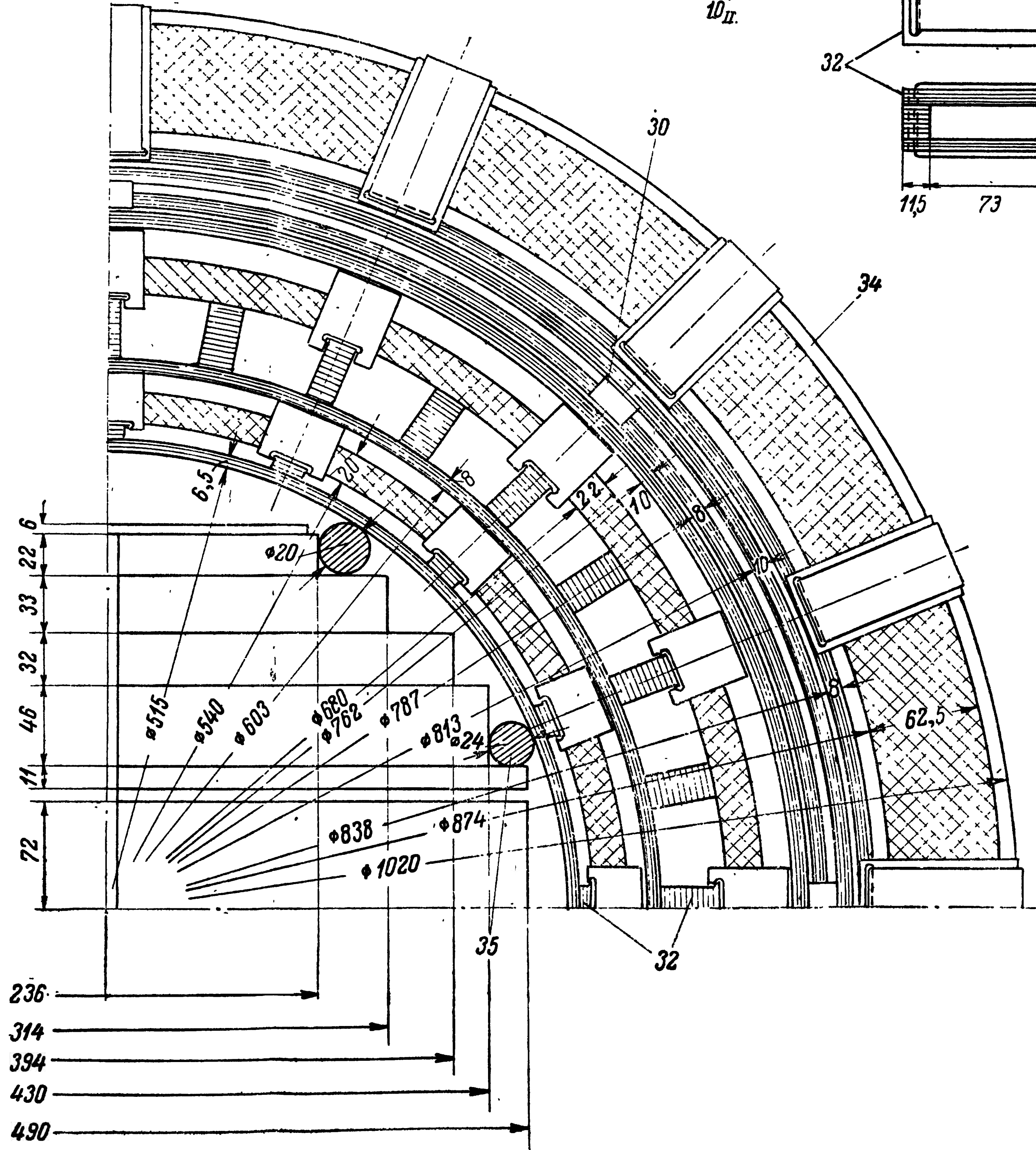
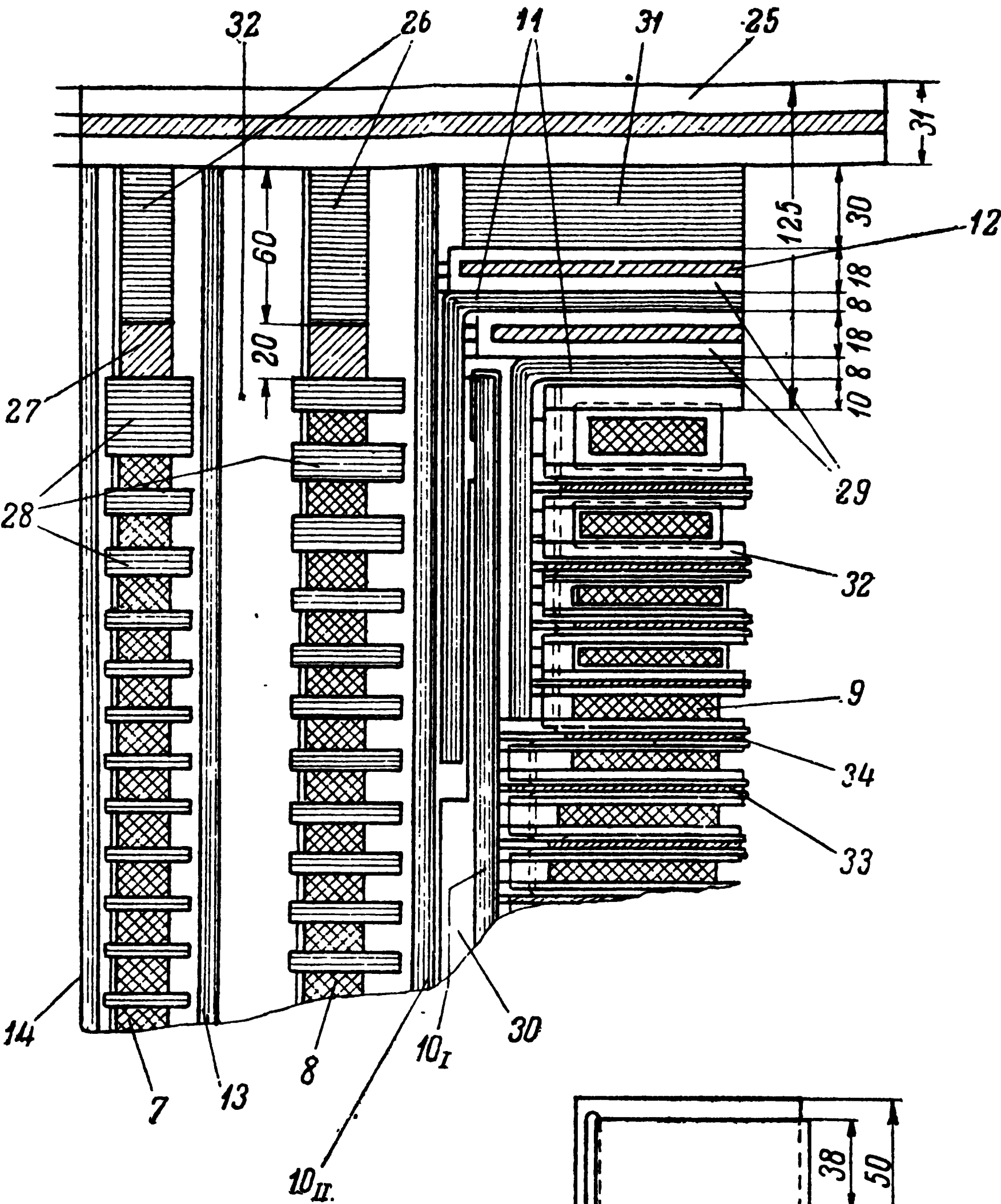


Чертеж II. Общий вид трехфазного трансформатора 50 kVA, 500/230 V, 50 Hz с естественным воздушным охлаждением.



Чертеж III. Общий вид однофазного трехобмоточного трансформатора 5000/3000/3000 кВА, $\frac{110}{\sqrt{3}} \left| \frac{33}{\sqrt{3}} \right| 6,6$ кВ, 50 Гц с естественным масляным охлаждением.

Обозначение детали	Наименование детали	Материал	Количество
7	Обмотка на 6,6 kV	Медный провод	
8	„ „ 33/√3 kV		
9	„ „ 110/√3 kV		
10 _I и 10 _{II}	Изолирующие цилиндры	Гэтифакс	2 + 2
11	Угловые шайбы	Элефантайд	4 + 4
12	Шайбы ярмовой изоляции	Пресшпан	2
13	Изолирующий цилиндр	Гэтифакс	2
14	„ „	„	2
25	Прокладки ярмовой изоляции	Пресшпан	4
26	Опорные кольца	„	4
27	Сегмент	Твердая фибра	32
28	Прокладка	Пресшпан	19640
29	„ „	„	128
30	Распорка	„	16
31	Опорное кольцо	„	4
32	Прокладка	„	2367
33	Обойма	„	„
34	Шайба	„	142
35	Штифт круглый	Бук	16



Чертеж IV. Детали к чертежу III.

Ответственный редактор *А. Д. Смирнов*. Техн. редактор *Р. В. Эмдина*.
Корректора: *Е. Х. Исаева* и *А. И. Исакова*.

Сдано в набор 22/VI 1938 г.	Индекс ЭЭ — 20-5-2.	Подписано к печати 27/VII 1938 г.
Уч.-авт. листов 28,35.	Авт. листов 27,71.	Изд. 1-ое.
Колич. туп. знаков в бум. листе 94400.	Печ. листов 23 $\frac{1}{2}$.	Бум. листов 11 $\frac{3}{4}$ + 5 вклеек.
Ленгорлит № 2857.	Тираж 5000.	Отпечатано на бумаге Камской ф-ки.
		Заказ № 576.

2-я типография ГСНТИ им. Евгении Соколовой. Ленинград, пр. Красных Командиров, 29.

